

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante



ESTUDIO DEL ANOMALOSCOPIO HEIDELBERG MULTI COLOR COMO TEST DE DETECCIÓN DE DEFECTOS CROMÁTICOS ROJO-VERDE Y AZUL- AMARILLO

Autor: Bruno Ferrando Santosjuanes

Trabajo de investigación dirigido por:

Dolores de Fez Saiz

Fecha: Junio del 2010

Dolores de Fez Saiz, profesora titular del Departamento de Óptica, Farmacología y Anatomía de la Universidad de Alicante,

CERTIFICA: que Bruno Ferrando Santosjuanes ha realizado bajo su dirección el Trabajo de Investigación que se recoge en la presente memoria.

Y para que conste a los efectos oportunos, firmo el presente certificado en Alicante, a 28 de Junio de 2010.

Fdo:
Dolores de Fez

VºBº Inmaculada Pascual
Directora Dpto. Óptica Farmacología y
Anatomía

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo de investigación fue realizado bajo la supervisión de la Dra. Dolores de Fez Saiz, a quien me gustaría expresar mi más profundo agradecimiento, por hacer posible la realización de este estudio. Además, de agradecer su paciencia, tiempo y dedicación que tuvo para que esto saliera de manera exitosa.

Al Departamento de Óptica, Farmacología y Anatomía de la Universidad de Alicante por proporcionarnos parte del material necesario, así como las instalaciones.

A mis padres y hermano, por apoyarme en todo lo que me he propuesto y estar siempre ahí.

A M^a del Mar Santamaría, por su confianza en mí y contagiarme su positividad y lucha.

A mis compañeros del máster, a M^a del Mar, Ana Belén, Pablo y Javi, por compartir los buenos y malos momentos durante estos dos años.

A José Manuel Rubio, por su ayuda en las repetidas pruebas en el laboratorio y sus mensajes de apoyo.

A todos mis amigos, por no olvidarse de mí en todo el tiempo que he estado ausente debido a las horas de estudio y trabajo.

A Pedro, Carol, Mari, Ana y Fiamma por su interés y ayuda en el trabajo y esas sesiones de cartas en el hall del sótano de la escuela.

A todas aquellas personas que han estado a mi lado y por descuido no han sido citados.

Por último, agradecer a todas las personas que de manera desinteresada han participado en las pruebas de nuestro estudio.

Gracias a todos.

OBJETIVOS DEL ESTUDIO

En el presente trabajo se ha analizado el funcionamiento del Anomaloscopio HMC para el estudio de la incidencia de anomalías cromáticas, aplicado a una población de 70 sujetos. También se realizó un estudio de visión del color en un sujeto diabético.

De todos los sujetos participantes en el estudio, 68 eran alumnos de la diplomatura de Óptica y Optometría de la Universidad de Alicante. También participaron en el estudio 2 sujetos para los que se conocía la existencia de una anomalía cromática sin especificar.

Primero se realizó un estudio básico para conocer la incidencia de defectos cromáticos en la población de 68 sujetos. Una vez conocida la cantidad de observadores con una anomalía cromática, se establecieron varios grupos poblacionales en los que se realizaron diferentes pruebas.

Tras el estudio se realizó un análisis con las ventajas e inconvenientes encontradas con el Anomaloscopio HMC y un testeo de los resultados del dispositivo en comparación con los diferentes test de detección utilizados para la clasificación de las diferentes alteraciones de la visión del color y así conocer la validez como prueba de detección.

Por último se ha realizado un manual de uso rápido del dispositivo para facilitar y agilizar el manejo del dispositivo.

ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN.....	5
1.1 - VISIÓN DEL COLOR NORMAL	5
1.2 - EL DIAGRAMA DE CROMATICIDAD	6
1.3 - LA ECUACIÓN DE RAYLEIGH.....	8
1.4 - LA ECUACIÓN DE PICKFORD-LAKOWSKI.....	9
1.5 - LA ECUACIÓN DE ENGELKING-TRENDELENBURG	9
1.6 - LA ECUACIÓN DE MORELAND	10
1.7 - CAPACIDAD DE DISCRIMINACIÓN CROMÁTICA	11
1.8 - FACTORES FÍSICOS QUE AFECTAN A LA VISIÓN DEL COLOR	11
II - NECESIDADES VISUALES DEL COLOR EN EL TRABAJO	13
III- ALTERACIONES DE LA VISIÓN DEL COLOR	15
3.1 - DEFICIENCIAS EN LA VISIÓN DEL COLOR.....	15
3.2 - DEFECTOS DE VISIÓN DEL COLOR ADQUIRIDOS.....	19
IV- DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS DE VISION DEL COLOR.....	21
4.1 - LÁMINAS PSEUDOISOCROMÁTICAS DE ISHIHARA.....	21
4.2 - FARNSWORTH-MUNSELL-100 HUE TEST	25
4.3 - ANOMALOSCOPIOS.....	30
ANOMALOSCOPIO DE DAVICO	31
ANOMALOSCOPIO HMC	33
V- METODOLOGÍA.....	36
5.1- ESTUDIOS PREVIOS.....	36
5.2 - OBSERVADORES DEL ESTUDIO	43
5.3 - PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	44
5.4 - ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE DATOS.....	46
VI – RESULTADOS Y DISCUSIÓN	47
VII - ESTUDIO DE LA VISIÓN DEL COLOR EN UN SUJETO DIABÉTICO	69
VIII - CONCLUSIONES	72
IX - PROYECTOS DE FUTURO	75
X - BIBLIOGRAFÍA	76

I - INTRODUCCIÓN

1.1-VISIÓN DEL COLOR NORMAL

Hay muchas maneras de producir una sensación de color dado. Por ejemplo, un "amarillo" puede ser producido por una radiación monocromática (589 nm) o por la mezcla aditiva de un color amarillo-verde (545 nm) y de un color amarillo-rojo (670 nm). El blanco se produce por una fuente continua de todas las radiaciones con longitudes de onda visibles, tales como el sol, o puede ser producido por una mezcla de tan sólo dos longitudes de onda, por ejemplo, 475 nm (azul) y 575 nm (amarillo). Cuando miramos un color amarillo u objeto de color blanco, en cualquier campo de color, no tenemos manera de saber la composición espectral del estímulo físico. (Vision Assembly of Behavioral, 1981).

EL EXPERIMENTO DE IGUALACIÓN DE COLOR

Gracias a esta incapacidad del sistema visual para distinguir las componentes de una mezcla de colores, podemos analizar la visión del color de un sujeto. Simplemente podemos pedirle que realice una igualación de color de un campo cromático con la adición de una serie de luces, y ver si las proporciones utilizadas corresponden a las de un sujeto normal o incluso detectar que no es capaz de realizar la igualación.

En un ejemplo típico de un experimento de igualación de color, el observador ve un campo circular formado por dos semicampos de medio punto.

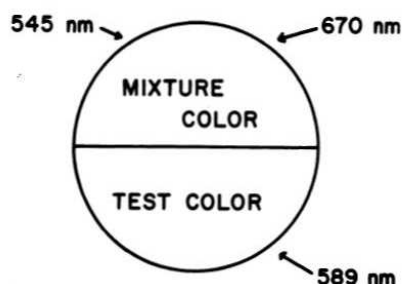


FIGURA 1. Vista del campo para el observador: un círculo con una línea divisoria negra. En este ejemplo, la mitad superior del campo aparece roja, naranja, amarilla, amarilla-verde, o verde en función de la cantidad de luz relativa de 670 nm y 545 nm. La mitad inferior es amarilla.

Las dos mitades del campo contienen diferentes bandas espectrales aisladas. En el ejemplo concreto que hemos elegido, la mitad superior del campo contiene una banda espectral estrecha centrada en 545 nm (amarillo-verde) y una banda espectral estrecha centrada en 670 nm (amarillo-rojo). La mitad inferior del campo contiene una banda espectral estrecha centrada en 589 nm (luz roja-amarilla). Con el ajuste de las cantidades de luz adecuadas de 545 nm y 670 nm, un observador puede hacer que el conjunto del campo parezca ser del mismo color. Las dos mitades del campo dividido contienen diferentes radiaciones del espectro y, sin embargo se ven como iguales por el observador. Dichos estímulos se conocen como metámeros.

Los observadores normales pueden igualar correctamente todos los matices de la mezcla de las tres luces de colores. Por lo tanto, los observadores normales son conocidos como tricrómatas (tri-tres, chroma-color). La igualación por lo general requiere que uno de los tres colores primarios de la mezcla se substraiga del campo de la mezcla. Debido a que la luz no se puede substraer físicamente, el tercer primario se añade al campo de la prueba, la tarea por tanto requiere emparejar la mezcla de la prueba de color y un primario a la mezcla de los dos primarios restantes. Los tricrómatas normales utilizan cantidades ligeramente diferentes de los primarios para hacer la igualación, pero es la similitud general entre los observadores normales con diferencias en la comparación de los colores pequeñas, lo que nos permite clasificar a un observador cuya visión del color estemos evaluando, como normal o anormal. (Vision Assembly of Behavioral, 1981). La condición de no normalidad (dicrómatas, monocrómatas o acrómatas) es debida a la falta o mal funcionamiento de uno o varios de los sistemas de conos, por lo que la mezcla de colores no será interpretada de la misma forma que en un sujeto normal.

1.2- EL DIAGRAMA DE CROMATICIDAD

Una manera de representar los resultados de los experimentos de la mezcla de color es mediante un diagrama cromático. El diagrama de cromaticidad fue ideado por la Comisión Internacional de Iluminación (CIE 1931) basado en la media de la igualación de color de muchos observadores normales. Un triángulo isósceles cubre totalmente el diagrama de cromaticidad determinado experimentalmente. El espectro de longitudes de onda está representado en todo el perímetro del diagrama de cromaticidad, que se llama el locus

espectral, y el color "blanco" se produce en el centro. Dado que el diagrama de cromaticidad representa sólo el rango de igualación del color y no los colores, los nombres de los colores se describen en la figura 2 y se proporcionan para la conveniencia de aquellos que no están familiarizados con la aparición de diferentes regiones de longitud de onda del espectro. (Lakowski R., 1968)

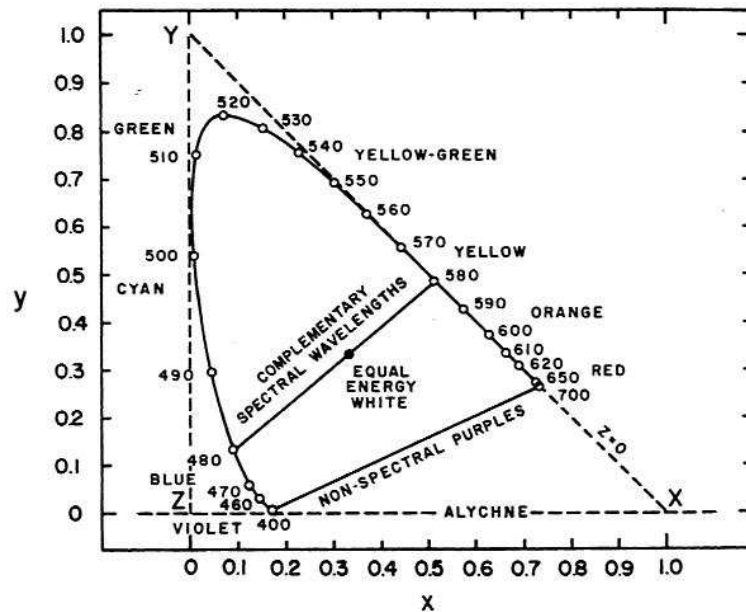


Figura 2. Diagrama de cromaticidad CIExy de la "norma" CIE 1931.

La saturación no se especifica en el diagrama de cromaticidad, pero en general se puede decir que la saturación a lo largo de una línea desde el centro del locus espectral aumenta con la distancia desde el centro. La línea que une las coordenadas de 400 nm y 700 nm es identificada como la línea de púrpuras no espectrales. Todos los colores reales pueden ser representados dentro de los límites formados por el espectro y los violetas. Las mezclas de dos cromaticidades pueden ser representadas por una línea recta que una las luces en el diagrama. Cada mezcla es un punto de la línea determinada por las cantidades relativas de los dos componentes de la mezcla. (Lakowski R., 1968).

Esta propiedad matemática de la mezcla de colores es la que se usa en el diseño de test para la detección de alteraciones cromáticas. Un sujeto con una deficiencia en uno de sus sistemas de conos presenta confusión de colores, que viene determinada por lo que se conoce como líneas de confusión: un conjunto de líneas en el diagrama cromático que van a confluir a un punto que depende del sistema de conos que falta. Todos los colores de una línea de confusión presentan el

mismo aspecto para ese sujeto, sean colores monocromáticos o colores mezcla. Dependiendo de la línea de confusión, se puede detectar si el sujeto presenta una confusión rojo-verde (protán o deután) o azul-amarillo (tritán). Aunque más adelante describiremos con detalle los diferentes tipos de alteraciones de la visión del color, hemos introducido en este punto las ecuaciones que describen algunas de las líneas de confusión usadas habitualmente para obtener en el diagrama cromático CIE_xy las mezclas de colores que determinarán si un sujeto presenta visión normal o no.

1.3- LA ECUACIÓN DE RAYLEIGH

La ecuación de Rayleigh diferencia tricrómatas normales de los observadores con defecto de color rojo-verde congénitos y permite la clasificación de estos defectos. La ecuación de Rayleigh es un tipo especial de igualación del color que implica que coincidan una luz espectral cerca de 589 nm a una mezcla de luces espectrales o casi espectrales cerca de 670 nm y 545 nm, como se muestra en la Figura 3 (las longitudes de onda exactas difieren en diversos instrumentos). Cuando los 670 nm y 545 nm de la mezcla se suman, los tricrómatas normales ven una amplia gama de tonalidades de amarillo-naranja, verde, amarillo o amarillo-rojo, dependiendo de la proporción en la mezcla. La tarea del observador es ajustar esta proporción para que el campo de la mezcla coincida exactamente con el campo de 589 nm. El observador también puede ajustar la luminancia del campo de 589 nm para lograr una coincidencia exacta. Un tricrómata normal puede hacer la igualación de forma rápida y fiable, localizando una proporción única de 670 nm y 545 nm, que se corresponde a 589 nm. (Vision Assembly of Behavioral, 1981; Barbur, J.L et al. 2008; Jordan, G y Mollon, J.D. ,1998).

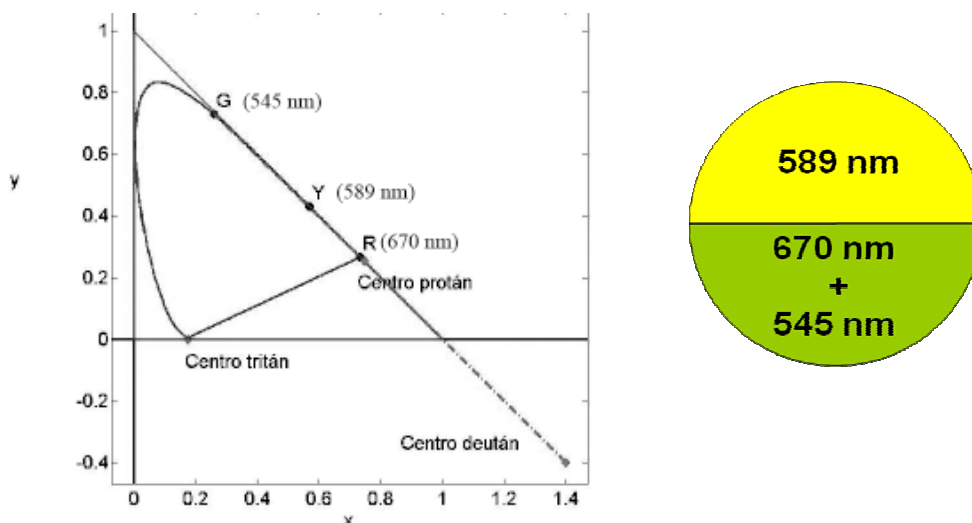


Figura 3. Detección de sujetos tipo deután.

1.4 - LA ECUACIÓN DE PICKFORD-LAKOWSKI

Una ecuación especial que está disponible en algunos anomaloscopios es la ecuación de una luz blanca que (a partir de una fuente de tungsteno) utiliza una mezcla de luces de 470 nm y 585 nm. (Vision Assembly of Behavioral, 1981).

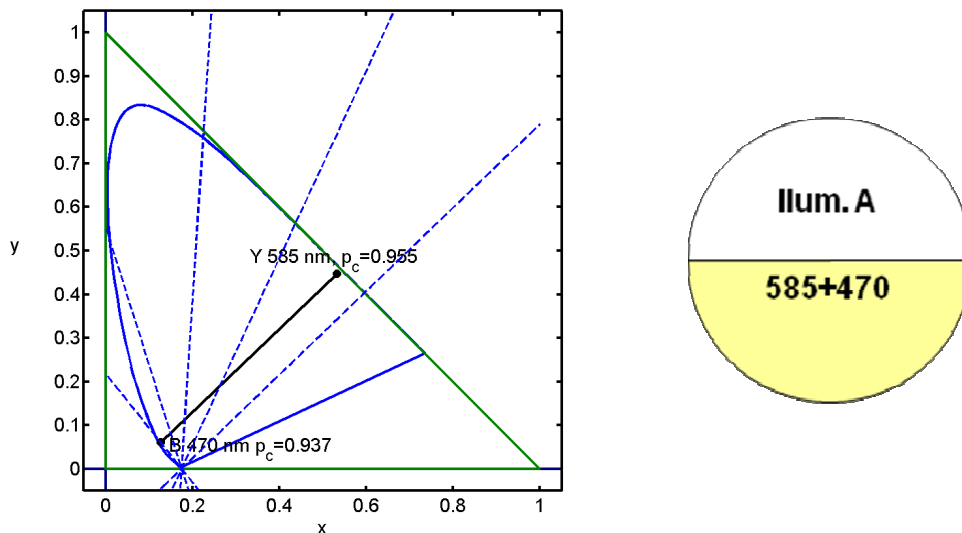


Figura 4. Detección de sujetos en el canal azul-amarillo.

ADAPTACIÓN DE LAKOWSKI (1969)

La ecuación fue diseñada para evaluar el efecto del envejecimiento (Pickford, 1968) y también ha resultado importante en la evaluación de los defectos de color adquiridos en las enfermedades del ojo (Lakowski, 1972).

1.5 - LA ECUACIÓN DE ENGELKING-TRENDELENBURG

Esta ecuación supone la igualación de una luz de 490 nm a una mezcla de 470 nm y 517 nm. Esta ecuación fue diseñada por Engelking y modificada por Trendelenburg para evaluar los defectos congénitos azul-amarillo (Engelking, 1925). Otros investigadores han utilizado diferentes longitudes de onda. En cuanto a la ecuación o ley de Rayleigh, el tricrómata normal hace una única igualación. La igualación puede estar fuertemente afectada debido a los pigmentos inertes del ojo. Esta ecuación muestra una amplia distribución de los puntos

medios en la población normal, disminuyendo así la utilidad de la igualación como una prueba para la detección de visión de color anómalo.

1.6 - LA ECUACIÓN DE MORELAND

La optimización original de los primarios azul y verde para el tritanomaloscopia (Moreland, 1984) utiliza los datos publicados entre mediados de los años 1940 y 1970. Los primarios azul (430 nm) y verde (500 nm) de Moreland en 1984 se escogieron para una igualación tritán que reducía al mínimo el efecto combinado de varianza debido al pigmento macular, el pigmento del cristalino en la población y la distribución del rango de igualación medio para los observadores normales. El cian (480 nm) y el amarillo (580 nm) habían sido seleccionados en un ensayo preliminar de optimización (Moreland y Kerr 1978) principalmente por razones de conveniencia. Se consiguieron desde la línea CY aproximadamente paralela a un tono constante en el locus del punto de igualación tricromático. (Wyszecki y Stiles, 1967). Esta propiedad de paralelismo se consideró un complemento necesario a la fijación del radio de ajuste C/Y. Se había fijado para conservar la ergonomía del anomaloscopia y realizar la igualación con sólo dos controles: azul-amarillo (tono) para el campo de comparación y C + Y (luminancia) para el campo de análisis. Sin embargo, con la relación de C/Y que se fijó en el instrumento, el pigmento macular y, en mucha menor medida, la variación del pigmento del cristalino afecta el estímulo C a nivel de la retina. En consecuencia los sujetos con gran pigmentación deberían hacer igualaciones con una notable diferencia de saturación. La mayoría de los desajustes en la saturación que se encuentran en la práctica realmente pasan desapercibidos por los sujetos no tratados previamente (Moreland, 1978).

El efecto de los cambios en la transparencia de la lente con la edad en el punto medio de la igualación es sistemático y se puede corregir mediante el establecimiento de una línea base apropiada a la edad. Esto se puede lograr a través de un estudio poblacional (Moreland, 1978; Moreland et al. 1991; Roth et al., 1991) o mediante el uso empírico de fórmulas de corrección con la edad (Pokorny et al., 1987; Moreland, 2004; Foster, D. H., 1991).

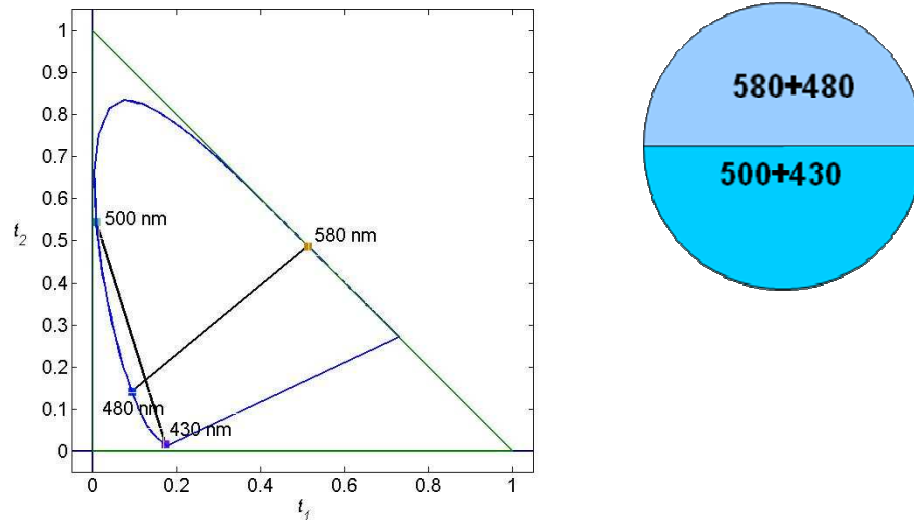


Figura 5. Detección de sujetos con defecto tritán

1.7 - CAPACIDAD DE DISCRIMINACIÓN CROMÁTICA

Hay una gran variabilidad entre los observadores de color normal en su capacidad para discriminar pequeñas diferencias de matiz o de saturación. Este hecho puede ser demostrado de distintas maneras. En igualaciones de color, distintos observadores han tenido diferentes rangos de igualación. Los observadores con buena discriminación de color toleran poco cambio en la proporción de la mezcla y tienen rangos estrechos de igualación. Los observadores con discriminación de color pobre tienen amplios rangos de igualación.

1.8 - FACTORES FÍSICOS QUE AFECTAN A LA VISIÓN DEL COLOR

La visión del color no es estática, la apariencia y la discriminación de color se ven afectadas por los cambios en la iluminación y el campo de visión.

Iluminación

Todas las pruebas de color están diseñadas para ser administradas con iluminaciones específicas. La discriminación de los colores es mejor en niveles medios o moderados de iluminación. En niveles muy elevados (resplandor), se disminuye la saturación aparente de los colores. A niveles muy bajos de iluminación, la discriminación se deteriora de una manera

característica. Por ejemplo, test de ordenación de muestras coloreadas como el FM-100 Hue presentan aumento de errores si se muestra con una iluminación de prueba no recomendada. (Vision Assembly of Behavioral ,1981).

Tamaño del campo

El tamaño del campo de visión es también importante en la visión del color. Cuanto mayor es el campo de visión, mejor será la discriminación del color. Los Tricrómatas normales muestran pequeños cambios, pero sistemáticos, en la igualación de Rayleigh cuando el tamaño del campo cambia (Pokorny y Smith, 1976). La reducción del tamaño del campo a 1 o 2° (el tamaño de una moneda) en un Anomaloscopio conducirá a una disminución de la discriminación. Los tricrómatas anómalos y dicrómatas muestran una mejora considerable en la discriminación cuando se amplía el tamaño del campo. El amplio rango que se obtiene con el campo del anomaloscopio habitual se vuelve más pequeño cuando se utiliza una prueba con un campo de gran tamaño (8°). Muchos dicrómatas no aceptan un rango de igualación grande en un anomaloscopio cuando el campo es 8° (Smith y Pokorny, 1977). Las estadísticas de población se basan en el uso de campos en el anomaloscopio de 1° a 2°. Estas pruebas pueden ser menos eficaces si el observador aumenta el campo de visión al acercarse las muestras. El presentar un gran campo con un Anomaloscopio, sin embargo, puede ser útil en el estudio de defectos adquiridos de color. (Toyeé. M.J., 2008)

II - NECESIDADES VISUALES DE COLOR EN EL TRABAJO

Las pruebas de visión del color se utilizan para una amplia variedad de propósitos. Algunos de estos incluyen la detección rápida de defectos congénitos en la industria, el transporte y los militares. La clasificación de la capacidad de discriminación de los defectos congénitos rojo-verde en la población se utiliza para fines de asignación de trabajo. Otro uso es el reconocimiento y el diagnóstico de enfermedades congénitas para el estudio psico-físico o genético. En la clínica, los estudios de detección se utilizan para el reconocimiento y la diferenciación de los trastornos congénitos y adquiridos, para la clasificación de los trastornos adquiridos en los pacientes con enfermedades oculares, y, en algunos casos, para la evaluación del tratamiento o para el seguimiento de la recuperación de la enfermedad o trauma.

Por último, en la educación y la industria, la detección de defectos de visión del color y las aptitudes de color se utilizan para la formación profesional y orientación en ocupaciones o profesiones que requieren juicios de color. Los dos principales problemas con el uso de las pruebas de visión del color son:

- 1- conocer los requisitos de visión del color de una determinada tarea
- 2- la selección de las pruebas de visión adecuadas del color.

Es esencial para el beneficio de empresarios y trabajadores que los requisitos de la visión del color de un trabajo se cumplan de forma adecuada. Sobre la base de estos requisitos profesionales, se puede conocer si la visión del color de un individuo es apta para ejercer las funciones específicas encontradas en las situaciones de trabajo diario. Tales evaluaciones prácticas de las cualificaciones pertinentes de color ayudan a evitar la asignación inadecuada de recursos humanos. Una de las principales dificultades en este sentido es la falta de una comprobación precisa de los requisitos de la visión en color para diferentes trabajos, no hay directrices para ayudar a los empleados a establecer los requisitos de color para un determinado empleo. (Lakowski, 1968).

OCUPACIONES CON MAYOR EXCLUSIÓN POR DEFECTOS DE LA VISIÓN DEL COLOR

Hay muchas actividades y ocupaciones en las que una mala visión del color es indeseable o inaceptable. En general, no se deben esperar observadores con defectos graves de color para trabajar en cualquier situación del sector en el que el objetivo sea el reconocimiento y/o clasificación de las superficies de color, luces u objetos. La visión de color anormal es por tanto una seria desventaja en todos esos ámbitos de la electrónica y las telecomunicaciones. También es esencial una buena discriminación del color en el transporte industrial (ferrocarril, marítimo o aéreo). (Vision Assembly of Behavioral ,1981).

OCUPACIONES QUE EXIGEN UNA CORRECTA VISIÓN DE LOS COLORES

En ámbitos como la investigación del color, la pintura comercial, la fotografía en color, la química, fabricación de papel, mezcla de pintura, las artes gráficas, la litografía, la cartografía, y teñido de textiles, es especialmente importante que los que realicen las igualaciones de color tengan una correcta visión del color igual que la mayoría de los consumidores. (Vision Assembly of Behavioral ,1981).

III - ALTERACIONES DE LA VISIÓN DEL COLOR

Las pruebas de visión de color se utilizan en la selección de personal para ciertas ocupaciones que requieren el uso de la visión del color. Estas pruebas también se utilizan clínicamente para identificar y diferenciar trastornos congénitos y adquiridos que afectan a la visión del color. Actualmente se utilizan diversas pruebas de visión de color y hay muchos dispositivos diferentes disponibles comercialmente. Es muy importante que los dispositivos para las pruebas de color sean validados antes de ser adoptados para la detección, lo que requiere la demostración de una prueba que realmente identifique y discrimine las deficiencias de la visión del color según sea necesario para las tareas de un trabajo particular. Algunas, pero no todas las pruebas disponibles comercialmente, han sido adecuadamente validadas.

3.1 – DEFICIENCIAS EN LA VISIÓN DEL COLOR

El término preferido para los defectos del color es deficiencia de visión del color. Los diversos tipos y grados de deficiencia de visión de los colores han adquirido una nomenclatura científica.

La clasificación estándar de las deficiencias de visión del color son las siguientes:

- **Dicromatismo:** Uno de los tres tipos de mecanismo de recepción del color no existe, probablemente por la falta de pigmento del cono. Existen tres tipos de dicromatismo. (Chaves Fernandes, L. y Carvalho de Ventura Urbano, L. 2008; Baraas, R. C., et al., 2010):
 1. **Protanopía:** El ojo carece de receptores de longitud de onda larga o pigmento de color rojo. Hay incapacidad para ver los rojos oscuros y confusión entre diferentes rojos, verdes y marrones, y entre varios tipos de púrpura.
 2. **Deuteranopía:** Poseen un espectro de sensibilidad similar a la de los observadores normales. El ojo carece de receptores de longitud de onda media o pigmento de color verde. Hay confusión entre los colores rojos y verdes y azules y púrpuras.

3. **Tritanopía:** Es una rara condición con un deterioro en la sensibilidad del azul. Hay confusión entre los colores azules y amarillos.
- **Anomalías tricromáticas:** La deficiencia de la visión del color suele estar causada por una alteración en la sensibilidad de uno de los tres mecanismos de los receptores, en lugar de una ausencia completa de uno de ellos. La longitud de onda con la que se alcanza la máxima sensibilidad se desplaza de la posición normal. Hay tres tipos de anomalías tricromáticas, dependiendo de qué mecanismo está alterado. (Baraas, R. C., et al., 2010):
1. **Protanomalía:** Necesitan una mayor proporción de primarios rojo sobre verde que los tricrómatas normales en la ecuación de Rayleigh. La sensibilidad de los mecanismos de los receptores del color rojo se ha desplazado de la posición normal.
 2. **Deuteranomalía:** Necesitan una mayor proporción de verde sobre rojo que los tricrómatas normales en la ecuación de Rayleigh. Este es el defecto más común en las deficiencias de visión del color. El máximo de sensibilidad de la longitud de onda media se encuentra desplazado.
 3. **Tritanomalía:** Es una condición rara, se altera la sensibilidad de los receptores azules.
- La acromatopsia se conoce como monocromatismo y se caracteriza por la incapacidad de distinguir colores. (Baraas, R. C., et al., 2010).

1. Monocromatismo de bastones

Esta forma de variación de color se llama ceguera de color y aparentemente está causada por una ausencia (o casi ausencia) de todas las funciones de los conos. Se considera como congénita y recesiva autosómica no ligada al sexo. El monocromatismo de bastones presenta un escotoma foveal y frecuentemente se relaciona con nistagmus (movimientos involuntarios de los ojos). Los sujetos son a menudo fotofóbicos (incomodidad moderada a la luz brillante que no ocurre en observadores normales) y siempre muestran una baja AV, alrededor de 20/200.

A menudo han demostrado ser útiles como sujetos para el estudio de visión de bastones en niveles relativamente altos, donde normalmente se entromete la visión de conos que hace que la investigación sea difícil.

El sujeto con monocromatismo de bastones no tiene discriminación de color. En investigaciones anatómicas postmortem (Glickstein y Heath 1975) se ha revelado la presencia de conos en el monocromatismo de bastones, a pesar de la falta de pruebas basadas en test psicofísicos. (Moskowitz, A, et al., 2009; Toueé. M.J. 2008)

2. Monocromatismo de conos

Alpern (1974) informó sobre el descubrimiento de monocromatismo de conos L. Su sujeto era capaz de hacer coincidir todos los colores del espectro, produciendo una curva de sensibilidad espectral igual a la de los deuteranopes, a excepción de longitudes de onda inferiores a 500 nm donde la sensibilidad del monocromatismo de conos L fue alta. El monocromatismo de conos M fue investigado por Weale (1935b), quien encontró que la sensibilidad espectral de los sujetos era un poco más alta en la igualación de la longitud de onda larga que la de los protanopes.

El monocromatismo de conos S es relativamente el más común, pero aún así es bastante raro. Los observadores tienen una AV máxima de 20/60, lo que concuerda bastante con las predicciones basadas en los sujetos normales en condiciones de aislamiento del cono S que se puede lograr con una fuente de luz amarilla y estímulos azules (Brindley, 1954).

Los términos protán, deután y tritán son usados para nombrar el tipo de anomalía y de dicromatismo, de forma genérica.

Tabla 1. Clasificación de las anomalías.

TERMINO FORMAL	SIGNIFICADO
Protanopía	Ausencia de rojo
Deuteranopía	Ausencia de verde
Tritanopía	Ausencia de azul
Protanomalia	Defecto de rojo
Deuteranomalia	Defecto de verde
Tritanomalia	Defecto de azul
Acromatopsia	Acromático

Tabla 2. Prevalencia de defectos congénitos de visión del color

Tipos de deficiencia de visión del color	Hombres	Mujeres
Total	~8%	~0.5%

Tricrómatas anómalo

Protanomalia	2%	0.01%
Deutanomalia	5%	0.4%
Tritanomalia	raro	raro

Dicrómatas

Protanopía	1%	0.01%
Deuteranopía	1.5%	0.01%
Tritanopía	0.008%	0.008%

Monocromatismo

Monocromatismo de conos	raro	raro
Monocromatismo de bastones	raro	raro

La deficiencia de verde es la forma de ceguera del color más común encontrada en la población. Llega a ser el 5% de la población en hombres. La distribución de las deficiencias del color no es uniforme en todo el mundo. Generalmente, la incidencia es alta en las zonas urbanas e industrializadas. La incidencia en hombres está en un 8% en Europa, Norte América y Australia. Hay que recordar que la causa de la deficiencia es genética, por tanto la causa de la deficiencia del color debe buscarse en la ascendencia en lugar de la geográfica.

3.2 - DEFECTOS DE VISIÓN DEL COLOR ADQUIRIDOS

Las pruebas de detección de pequeñas diferencias de color son mejores en los jóvenes en sus primeros veinte años. Existen pocos observadores mayores de 25 años que muestren una discriminación de color excelente. La pérdida de la discriminación de color se muestra mediante un patrón característico: la discriminación en el eje azul-amarillo está más afectada que la discriminación en el eje rojo-verde. Por lo tanto, los tricrómatas normales muestran una considerable ampliación de sus rangos de igualación en las igualaciones de Engelking-Trendelenburg y Pickford-Lakowski a medida que aumenta su edad (Lakowski, 1958; Ohta y Kato, 1976), mientras que el rango de igualación para la ecuación de Rayleigh muestra poco o ningún cambio con la edad. En el test FM-100 Hue, los observadores cometen mayor número de errores y puede mostrar la pérdida de la discriminación azul-amarillo (Ohta, 1961; Lakowski, 1962; Verriest, 1963; Krill y Schneiderman, 1964). La pérdida de la capacidad discriminativa con la edad es fundamental pero no exclusivamente atribuible al proceso de envejecimiento del cristalino del ojo (Lakowski, 1962). La lente gradualmente se vuelve más densa y se pueden acumular pigmentos, que generalmente absorben la longitud de onda corta de la luz (la lente puede aparecer amarillenta). Como consecuencia de ello hay menos luz en la retina, sobre todo de longitud de onda corta. Estos efectos de la edad no son triviales. Las pérdidas discriminativas con la edad pueden ser importantes en determinadas situaciones de trabajo. (Foster, D. H., 1991; Sun, Y. y Shevell, S.K. (2008; Cvetković D y Cvetković D., 2005; Touéé. M.J. 2008)).

Tabla 3. Pokorny y Smith: Defectos congénitos y adquiridos de la visión del color. Grune y Stratton Pub. Inc. New York.

CAUSA ó PATOLOGÍA	ANOMALÍA	
	Rojo - Verde	Amarillo - Azul
Anemias		•
Arteriosclerosis		•
Atrofia de nervio óptico	•	
Coroiditis	•	•
Falta Vitamina A	•	•
Degeneración macular	•	•
Desprendimiento de retina	•	•
Diabetes mellitus		•
Estrías angioides	•	•
Exoftalmos (tiroides)		•
Glaucoma		•
Hemovitreo	•	
Ictericia		•
Lesiones tracto óptico	•	
Melanoma de coroides		•
Neuritis óptica	•	
Neuritis retrobulbar	•	
Oclusión arterial (retina)		•
Papiledema		•
Retinoschisis	•	•
Síndrome hipereviscosidad		•
Trombosis del seno cavernoso		•
Tumores del nervio óptico	•	
Tumores del quiasma	•	

Como se observa en el gráfico, numerosas patologías oculares se relacionan con una posible anomalía en la visión del color. Dependiendo de la causa, existe una mayor probabilidad de tener un defecto rojo-verde o azul-amarillo.

Atendiendo a la tabla, la diabetes o el glaucoma suelen causar un defecto Azul-amarillo mientras que los defectos rojo-verde están más asociados a patologías del nervio óptico.

IV - DESCRIPCIÓN GENERAL DE LAS PRUEBAS DE VISIÓN DEL COLOR

4.1 - LÁMINAS PSEUDISOCROMÁTICAS DE ISHIHARA



Figura 6: Ejemplares de las láminas de Ishihara

DESCRIPCIÓN GENERAL

Los test de Ishihara se usan en todo el mundo como test de detección para deficiencias del color rojo-verde. El test no está diseñado para identificar defectos tipo tritán.

Aunque todas las ediciones presentan el mismo diseño, la calidad del color impreso varía ligeramente en diferentes ediciones, pero esto tiene poco efecto en su rendimiento (Birch y McKeever, 1993). El test de Ishihara tiene la mayor variedad y un formato complejo mayor que todos los test pseudoisocromáticos. El completo, o estándar, contiene 38 láminas. 25 láminas contienen números y 13 láminas contienen caminos destinados a personas que no conozcan los números. (Miyahara, E. ,2009; Miyahara, E. ,2008).

DESCRIPCIÓN DE LAS LÁMINAS

La serie de láminas que hemos utilizado está formada por las siguientes 38 láminas.

No. 1. Es leída como 12, tanto por las personas con visión normal como por aquellas con deficiencia cromática.

Nos. 2-5. En los casos normales se leen como 8 (Nº.2), 6 (Nº.3), 29 (Nº.4) y 57 (Nº.5).

Nos. 6-9. En los casos normales se leen como 5 (Nº.6), 3 (Nº.7), 15 (No.8) y 74 (Nº.9).

Nos. 10-13. En los casos normales se leen como 2 (Nº. 10), 6 (Nº.11), 97 (Nº. 12) y 45 (Nº. 13).

Nos. 14-17. En los casos normales se leen como 5 (Nº. 14), 7 (Nº.15), 16 (Nº. 16) y 73 (Nº. 17).

Nos. 18-21. La mayoría de los casos normales no son capaces de leer ningún número.

Nos. 22-25. En los casos normales se leen como 26 (Nº. 22), 42 (Nº. 23), 35 (Nº. 24) y 96 (Nº. 25).

Nos. 26-38. Estas láminas contienen diseños de líneas de colores que utilizan el mismo procedimiento para evaluar los defectos de color que las láminas 1-25. Estas láminas se utilizan en personas analfabetas en las que les es imposible indicar el número existente en cada una de las láminas.

ADMINISTRACIÓN

Las láminas están diseñadas para ser apreciadas correctamente en una iluminación diurna adecuada. La introducción de la luz diurna directamente o el uso de luz eléctrica pueden producir discrepancias en el resultado porque hay una alteración en la apariencia de los tonos del color. Es conveniente utilizar sólo la luz eléctrica, debería ser ajustada para parecerse a la luz diurna. Las láminas son mostradas a unos 75 cm del observador y en el ángulo correcto de la línea de visión.

Las 25 láminas numéricas consisten en 1 lámina que demuestra la tarea visual, 20 láminas para la detección y 4 láminas para la clasificación de protán/deután.

Birch, J. (1997) encontró que poco más del 50 por ciento de las personas con deficiencias de color son capaces de ver diseños ocultos de dos dígitos. Por consiguiente, sólo

hasta la lámina 16 está diseñada para detección. Sin embargo, las láminas de Ishihara no están destinadas para evaluar el grado de severidad de la deficiencia del color, los sujetos con una leve deficiencia de color hacen poco más de 8 errores.

Menos del 5 por ciento de personas normales hacen más de 3 lecturas erróneas. El diseño de Serif de números en las láminas de Ishihara causa pérdidas de lectura en personas normales que llenan los bucles parciales en el diseño. Por ejemplo, el “5” se interpreta como “6”, o el “3” como “8”. Solo el 55 por ciento de personas normales obtienen un resultado perfecto. Lecturas erróneas por confusión de números no deberían incluirse como errores. Este tipo de mala interpretación se refiere algunas veces a un “error parcial” y puede aparecer en diferentes pacientes con deficiencias de color y normales. Las personas con deficiencias del color, tienen errores de registro claro sobre las demás láminas y no hay incertidumbre en el resultado global. El gran número de láminas para la detección y los diferentes tipos de diseños, posibilitan “errores parciales” por ser introducidos en el contexto incorrecto. (Miyahara, E. ,2009; Miyahara, E. ,2008).

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con la evaluación de la lectura de las láminas 1 a 21 se determina la normalidad o el defecto de visión de color. Si 17 o más láminas se leen de forma normal, el resultado de la visión de color se considera normal. Si sólo 13 o menos de 13 láminas se leen de forma normal, la visión de color se considera deficiente. Sin embargo, en referencia a las láminas 18, 19, 20 y 21, aquellos observadores que leen los números 5, 2, 45 y 73 se registran como anormales.

Para la evaluación de cada caso se requiere el uso de otros test de visión de color, incluyendo el anomaloscopio.

Para la evaluación de la apreciación del color por el método corto se utilizan solo las 4 últimas láminas, una respuesta normal de todas las láminas es una prueba de visión del color normal. Si hay discrepancia en cualquier respuesta, se debe utilizar la serie completa de láminas antes de diagnosticar la deficiencia del rojo-verde. (Miyahara, E. ,2009; Miyahara, E. ,2008).

Tabla 4. La marca X significa que la lámina no se puede leer. El espacio en blanco indica que la lectura es indefinida. Los números entre paréntesis muestran que pueden ser leídos pero son relativamente difíciles de leer.

Número de Lámina	Persona normal	Persona con anomalía Rojo-verde		Persona con ceguera total del color o dicrómata	
1	12	12		12	
2	8	3		X	
3	6	5		X	
4	29	70		X	
5	57	35		X	
6	5	2		X	
7	3	5		X	
8	15	17		X	
9	74	21		X	
10	2	X		X	
11	6	X		X	
12	97	X		X	
13	45	X		X	
14	5	X		X	
15	7	X		X	
16	16	X		X	
17	73	X		X	
18	X	5		X	
19	X	2		X	
20	X	45		X	
21	X	73		X	
		Protán		Deután	
		Fuerte	Leve	Fuerte	Leve
22	26	6	(2)6	2	2(6)
23	42	2	(4)2	4	4(2)
24	35	5	(3)5	3	3(5)
25	96	6	(9)6	9	9(6)

FIABILIDAD

La sensibilidad es aproximadamente del 96 por ciento con 8 errores, del 98 por ciento con 6 errores y del 99 por ciento con 3 errores. La especificidad sigue siendo del 100 por cien si las lecturas erróneas se distinguen de los errores.

Estos resultados conducen a la conclusión que el fracaso de las láminas de Ishihara, en la cual se identifican deficiencias del color rojo-verde, tiene un mínimo de 3 errores (no

errores de lectura) con el test de 38 láminas, y 2 errores con el test de 24 láminas. (Miyahara, E., 2009; Miyahara, E., 2008).

VALIDEZ

Los estudios de la validez de este test se centran sobre todo en la clasificación tipo protán/deután basado en las 4 láminas 22-25. Si un sujeto falla todas las láminas, esto nos indica deficiencias severas en el rojo-verde. Birch (1997), encontró que esta respuesta fue dada por el 18% de protanopes y del 3% en deuteranopes, además de por anómalos tricromáticos severos. Sobre el 40 por ciento de los tricrómatas anómalos ven ambas clasificaciones numéricas dentro de la lámina y se obtiene la clasificación correcta. Si se le pide al sujeto que compare la claridad (brillo) de los números y asumimos que los números menos claros no han sido vistos, se obtiene la clasificación correcta en el 94% de los casos. (Miyahara, E., 2009; Miyahara, E., 2008).

4.2 - FARNSWORTH-MUNSELL-100 HUE



Figura 7: Fichas de ordenación del FM-100 Hue

DESCRIPCIÓN GENERAL

Este test está formado por fichas de color que, vistas bajo iluminante D65 corresponden a un círculo completo de tono en el Atlas Munsell del Color (*Munsell Book of Color* 1915), aproximadamente de la misma luminosidad y presentan el mismo nivel de croma (definido como la cantidad de color del estímulo comparado con un blanco).

Si un sujeto es tricrómatas anómalo o dicrómatas, ordenará incorrectamente las fichas coloreadas pertenecientes a la misma recta de confusión. La región de pérdida de alteración que sufre el sujeto y el número de errores cometidos indica su grado o intensidad. Los ejes de máxima pérdida de discriminación son 17 y 64 para observadores protán, 15 y 58 para deután y 5 y 45.5 para tritán. Este test permite distinguir claramente entre las dos clases de alteraciones rojo-verde gracias a que las rectas de confusión protán y deután elegidas son suficientemente diferentes. Por otra parte, la capacidad de detectar y clasificar alteraciones tipo tritán es particularmente relevante, ya que la mayoría de las alteraciones adquiridas de la visión del color afectan a la discriminación azul-amarillo.

Las fichas se organizan en cuatro cajas de 21 a 22 piezas cada una, de las cuales la primera y la última son fijas y se utilizan únicamente como referencia para el sujeto. (Luque, M. J., et al. , 2001; Vision Assembly of Behavioral ,1981).

ADMINISTRACIÓN

Antes de comenzar explicaremos detalladamente al sujeto en qué consiste el test y nos cercioraremos de que lo comprenda. Debido a la relativa complejidad de la tarea, no es recomendable el uso de este test con niños de edad inferior a 9 años. Si sospechamos que el paciente presenta alguna alteración cromática evitaremos empezar el test con las cajas que contengan los ejes de pérdida de discriminación protán, deután o tritán. De esta manera facilitamos la comprensión de la tarea. Empezar por la caja dos en este caso suele ser conveniente.

Presentaremos al paciente cada una de las cajas, a una distancia de cincuenta centímetros e iluminadas con iluminante D65, con las piezas desordenadas en la tapa superior. El paciente deberá ordenar las piezas por color entre las dos fichas fijas de la parte inferior de la caja. Para ello dispondrá de todo el tiempo que necesite, ya que la precisión de la respuesta es más importante que la velocidad. A un sujeto normal suele bastarle dos minutos por bandeja, mientras que los sujetos con alteraciones en la visión del color necesitan más tiempo.

Al completar el test cerramos la caja y la invertimos para leer los números situados bajo las muestras de color. Como los resultados del FM-100 Hue mejoran con el aprendizaje,

suele ser recomendable realizar al menos dos test para clasificar al sujeto con precisión (Luque, M. J., et al., 2001; Vision Assembly of Behavioral, 1981).

PUNTUACIÓN

La distancia perceptual entre dos fichas consecutivas del test es constante e igual a la mínima diferencia perceptible (mdp) por un observador. La distancia entre las piezas N y N + 1 sería de 1 mdp, entre N+ 1 y N+2 también de 1 mdp. Etc. Con el procedimiento diseñado por Farnsworth, para una ficha determinada calculamos la suma de las distancias perceptuales entre esa ficha y la que le precede y le sigue en la ordenación hecha por el paciente. (Luque, M. J., et al., 2001; Vision Assembly of Behavioral, 1981).

Por ejemplo (de Fez, M.D. 2009): supongamos la ordenación: 1-2-5-4-3:

- error de la ficha 2= $(2-1) + (5-2)=4$;
- error de la ficha 5= $(5-2) + (5-4)=4$;
- error de la ficha 4= $(5-4) + (4-3)=2$

Las puntuaciones obtenidas se representan en el diagrama de coordenadas polares de la hoja de resultados, en el que la coordenada angular representa el número de la ficha y la coordenada radial la puntuación de la misma.

Para caracterizar o diagnosticar al observador, a partir de las puntuaciones obtenidas se calcula el error total, así como los centros de gravedad de las regiones de mayor pérdida de discriminación. El error total se define como la suma de las puntuaciones de cada ficha. No es lo mismo una puntuación de 150 con errores generalizados, que la misma puntuación debida a errores concentrados en una región particular. En cuanto al centro de gravedad o eje de una región de pérdida de discriminación se define como aquella ficha que divide dicha región en dos zonas en las que la suma de los errores es aproximadamente igual. (Luque, M. J., et al. 2001; Vision Assembly of Behavioral, 1981).

FIABILIDAD

La fiabilidad de los resultados obtenidos con el test FM-100 Hue depende de su correcta administración y puntuación. En cuanto a la administración, el requisito más fuerte es el de la

iluminación: debe ser lo más parecida posible a un iluminante D65. En caso de necesidad puede utilizarse luz de día indirecta pero hay que evitar, en general, las lámparas fluorescentes. (Luque, M. J., et al., 2001; Vision Assembly of Behavioral ,1981).

VALIDEZ

Los observadores con visión normal del color pueden tener algunos errores en las cuatro cajas, debido entre otras causas, a la edad del observador, el tiempo de la prueba y las condiciones de iluminación. Estos errores no suelen ser relevantes siempre que no superen un número significativo. La cantidad de errores debe ser estudiada por el administrador ya que debe ser éste quien evalúe un posible defecto cromático. (Luque, M. J., et al., 2001; Vision Assembly of Behavioral ,1981).

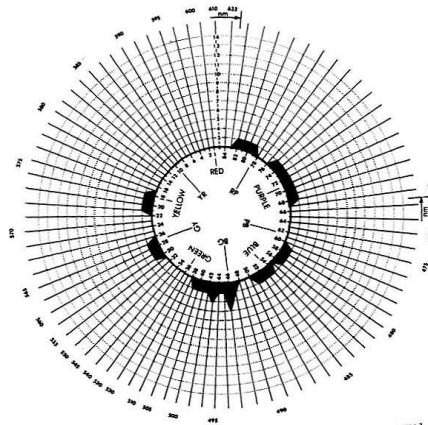


FIGURA 8. Ejemplo de errores en el FM-100 Hue hecha para un tricrómata normal. El número total de errores fue de 40. Sobre la base de datos no publicados de V.C. Smith y J. Pokorny.

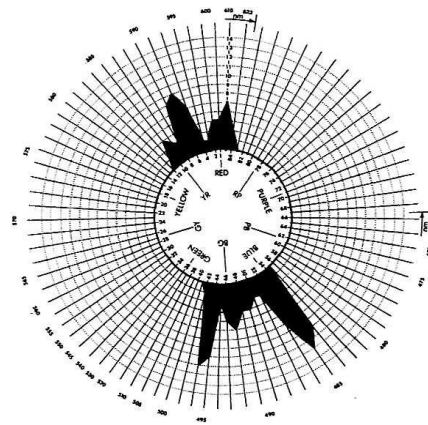


FIGURA 9: Ejemplo de perfil del tritanope.

Fuente: Farnsworth (1957) con permiso de Farnsworth-Munsell-100 Hue Prueba, disponible de Munsell Color, 2241 N. Calvert Street, Baltimore, Maryland 21218, EE.UU.

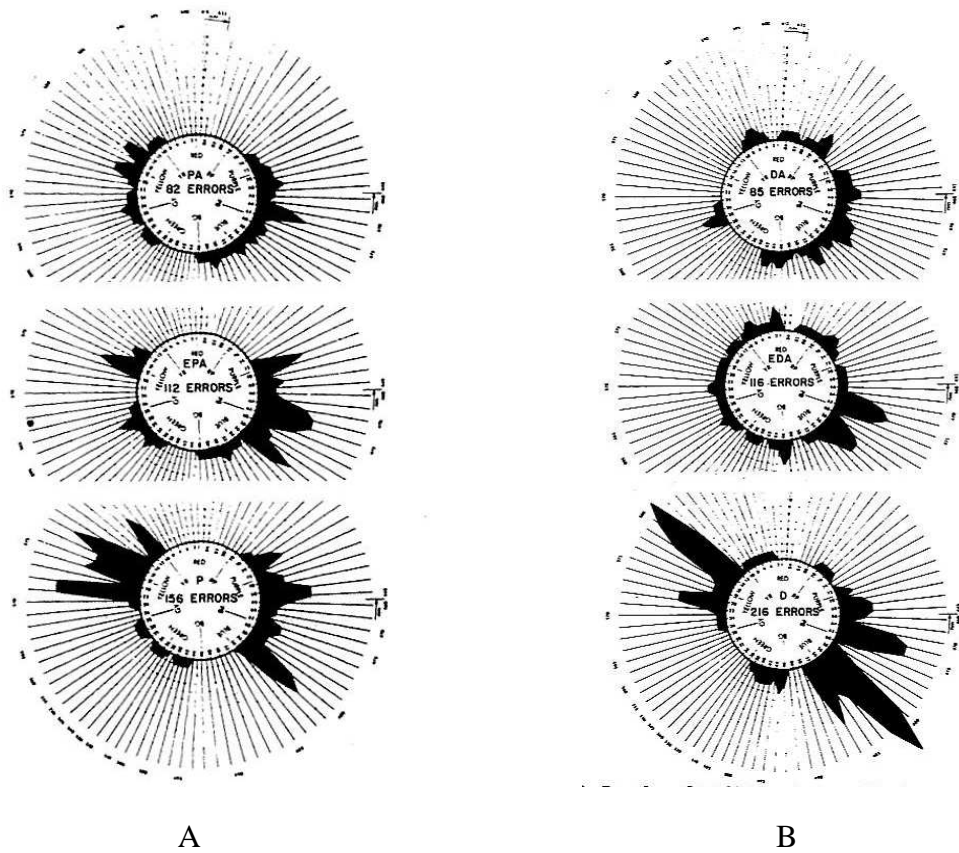


FIGURA 10:

(A) Ejemplos de la prueba FM-100 Hue para un tricrómata protanómalo , de un tricrómata protanómalo severo, y un protanope (estudiantes de edad media de 20).

Basado en datos de Lakowski (1971).

(B) Ejemplos de la prueba FM-100 Hue para un tricrómata deuteranómalo , de un tricrómata deuteranómalo severo, y un deuteranope (estudiantes de edad media de 20).

Basado en datos de Lakowski (1971).

4.3 - ANOMALOSCOPIOS

Los anomaloscopios son instrumentos ópticos en los que el observador debe hacer coincidir dos semicampos en color y brillo. El anomaloscopio es el instrumento estándar para el diagnóstico de defectos en la visión del color. Cuando se complementa con la información de diferentes pruebas de visión del color, los resultados proporcionados por este instrumento permiten la clasificación exacta de todas las deficiencias de color. De todas las pruebas de visión del color, los anomaloscopios son los más difíciles de usar. Se necesita una amplia capacitación de los examinadores si se van a utilizar válidamente y de manera eficiente, por lo que estos instrumentos se encuentran más frecuentemente en entornos de investigación. Sin embargo, cuando se utiliza por un examinador cualificado, el anomaloscopio tiene las ventajas de ser un buen instrumento de diagnóstico. (Foster, D. H., 1991).

IGUALACIÓN DEL COLOR METAMÉRICO CON UN ANOMALOSCOPIO

La igualación con el anomaloscopio se logra con una mezcla variable de los colores con iluminación fija en comparación con una prueba de color de luminancia variable. Lo ideal sería que los colores primarios sean estímulos de comparación elegido de los extremos de una línea adecuada de confusión dicromática. La igualación proporciona tres tipos de información para el diagnóstico: el rango de igualación, punto de igualación medio y el rango de luminancia. El primero evalúa la discriminación de color. El segundo (si el rango de igualación es aceptablemente pequeño) evalúa la normalidad o de lo contrario los espectros de fotopigmento, y la última evalúa la sensibilidad espectral (que se refleja por la pendiente de la línea de la luminosidad en una parcela de ensayo frente a la luminancia primaria de la mezcla). La importancia de cada uno de estos, es diferente en las deficiencias congénitas y adquiridas. Por ejemplo, el rango de igualación es particularmente importante en las deficiencias adquiridas y, en los procedimientos clínicos de (Trendelenburg 1929, 1939; Linsksz, 1964), el rango se mide en las condiciones de estímulo neutral y sin estímulo (Foster, D. H., 1991).

ANOMALOSCOPIO DE DAVICO



Figura 11: Anomaloscopio Davico.

DESCRIPCIÓN GENERAL

El modelo utilizado en este estudio se utiliza para el caso de defectos rojo-verde, haciendo uso de la ecuación de Rayleigh para obtener las coordenadas del color mezcla, que consiste en la igualación de un test amarillo mediante la mezcla en la proporción adecuada de rojo y verde.

El sistema consiste en un dispositivo que presenta al observador un campo visual bipartito. En uno de los semicampos se presenta una luz monocromática amarilla y en el otro una mezcla de dos luces monocromáticas, una verde y otra roja (ecuación de Rayleigh). El observador debe realizar una igualación colorimétrica perceptual entre ambos semicampos, variando la proporción de las luces roja y verde (aumentando una o disminuyendo la otra). Además puede variar la claridad del semicampo amarillo para ajustar de la forma más perfecta posible la igualación.

Los sujetos normales igualarán en un rango pequeño de proporciones de luz roja-verde. Los sujetos dicrómatas igualarán en todo el rango de mezcla, cualquier proporción de rojo y verde será idéntica al amarillo salvo en claridad. Los sujetos anómalos tipo protán y deután igualarán con una gran variedad de proporciones de ambas luces roja y verde, y además el intervalo de igualación es de mayor tamaño y se encuentra desplazado respecto al de los observadores normales. Esto se debe a que el desplazamiento de la curva de respuesta de uno de los pigmentos hace necesario un balance de intensidades también desplazado: el protán

pondrá mayor cantidad de rojo y el deután mayor cantidad de verde, para compensar la disminución de sensibilidad en ambos casos. (de Fez. M.D., 2009).

PUNTUACIÓN

Se dispone de diferentes criterios para la clasificación de los sujetos, siendo el más usado el criterio de Pickford:

- si el punto medio del rango de igualación del observador cae dentro del intervalo normal y la desviación estándar es similar a la anchura de dicho intervalo, el observador se clasifica como normal,
- si tanto el punto medio como la desviación estándar caen fuera del intervalo normal, el observador se clasifica como anómalo simple, (protanómalo/deutanómalo simple),
- si el punto medio cae fuera del intervalo normal pero la desviación estándar incluye parte de este intervalo, el observador se clasifica como anómalo desviante,
- si el intervalo de desviación estándar incluye el rango normal pero se alarga por ambos extremos, el observador se clasifica como anómalo extremo,
- si el observador iguala en todo el intervalo [0 99], se clasifica como dicrómata: protanope/deutanope, pero no es posible distinguir uno de otro y habrá que recurrir a otro test.

También se recurre a otro test en el caso de los normales desviantes en los que el punto medio caiga dentro del intervalo normal y la desviación por ambos lados sea de magnitud similar. (de Fez. M.D., 2009).

ANÁLISIS DE RESULTADOS

La escala utilizada parte del valor 0, que corresponde al color rojo, hasta el valor 99 que corresponde al verde. Del 65 al 75 está la zona en que se considera que no existe ninguna alteración.

En esta prueba hay que tener en cuenta dos valores. Primero la media, que nos indica el punto medio de las 6 respuestas obtenidas, y por otra parte la desviación estándar, que nos indica la diferencia entre las respuestas. (de Fez. M.D., 2009).

VALIDEZ

Con este test podemos clasificar si el sujeto es tricrómata anómalo (es capaz de igualar la mezcla aunque en proporciones diferentes a la del sujeto normal) o si es dicrómata (si el observador ve igual en todo el intervalo de proporciones).

Mediante este test también podremos distinguir entre protanómalo que será el sujeto que necesite añadir más cantidad de rojo para ver igual la mezcla, y deuteranómalo que será aquel que añada más verde. (de Fez. M.D., 2009).

ANOMALOSCOPIO HMC



Figura 12: Anomaloscopio HMC con la unidad de control.

En el apéndice se puede consultar con más detalle la descripción y características más relevantes de este Anomaloscopio, así como su funcionamiento.

DESCRIPCIÓN GENERAL

El Anomaloscopio HMC utiliza la ecuación de Rayleigh para defectos rojo-verde y la ecuación de Moreland para defectos azul-amarillo. El instrumento muestra un campo circular dividido. Para la ecuación de Rayleigh, en la mitad inferior, aparece un espectro amarillo (589

nm). La mitad superior del campo se llena con una mezcla espectral de amarillo-verde (549 nm) y rojo (666 nm).

Para la ecuación de Moreland, en la mitad inferior, aparece un espectro Cian (480 nm) + Amarillo (589 nm) y en la mitad superior del campo una mezcla espectral de Azul (436 nm) + Verde (490 nm).

La igualación se obtiene mediante el giro de dos ruedas, la superior varía el tono de la semiesfera superior y la inferior varia la iluminación de la parte inferior. Con ellas el observador debe de ser capaz de igualar los dos semicampos, pulsando el botón derecho si lo consigue y el botón izquierdo si no ha sido posible. (Oculus. *Instruction Manual HMC Anomaloskop M*).

Para obtener un diagnóstico, el Anomaloscopio HMC obtiene el AQ que es el cociente de anomalía, un parámetro que nos sirve para identificar el defecto de visión del color y así poder compararlos con otros Anomaloscopios. También se muestran los datos de M, R (Mezcla de primarios y cantidad de iluminación respectivamente). El M nos dice donde está descentrado el punto de igualación, a continuación habrá que acotar el rango de igualación, que es la distancia entre las dos medidas extremas de M (rango donde el observador confunde todos los colores presentados). El R nos indica la cantidad de luz que el sujeto necesita para igualar el campo de comparación. Este último no influye en la obtención del AQ, sólo se necesita la proporción de la mezcla de primarios (Stillman, J.A., 2008; Oculus. *Instruction Manual HMC Anomaloskop MR*).

ADMINISTRACIÓN

La adaptación neutral es presentada por el instrumento mediante diferentes intervalos de presentación al mostrar un campo circular con una luz blanca uniforme durante el examen. La adaptación neutral es importante porque la adaptación al color puede ocurrir cuando estamos observando el campo durante un largo periodo de tiempo y esto distorsiona los resultados de la prueba.

En el procedimiento de examen se pide al observador que iguale la apariencia del color para obtener tanto los intervalos de igualación como los cocientes de anomalía. Para un

observador normal estos rangos son pequeños y aumentan en las diferentes anomalías. (Oculus. Instruction Manual HMC Anomaloskop MR).

Los modos de examen disponibles en el Anomaloscopio HMC son: Prueba manual, prueba de detección y prueba específica.

La prueba de detección (screening) es un método rápido para detectar anomalías cromáticas en un grupo de observadores grande, sin embargo tiene algunos inconvenientes. Con esta prueba no se puede obtener el rango de igualación para un observador normal o un tricrómata leve, pues sólo se realiza una presentación en la zona normal, otras dos en las zonas de deuteranomalía y protanomalía y dos más en las zonas extremas, por tanto sólo obtendremos un dato de AQ, M y R. En un observador dicrómata o tricrómata anómalo extremo sí que se podría obtener un rango de igualación debido a que consiguen hacer varias igualaciones en diferentes puntos de la mezcla de primarios, pero habría que realizar pruebas específicas posteriormente para acotar el rango, pues con esta prueba sólo se realizan 5 igualaciones de color en todo el rango de la mezcla de primarios en la ecuación de Rayleigh y 6 en la ecuación de Moreland.

Para obtener resultados más detallados habrá que realizar la prueba específica ya que nos permite determinar el rango de igualación haciendo un barrido en diferentes puntos de la zona a estudiar.

Otra opción será utilizar la prueba manual en la que el examinador determinará la ecuación de la mezcla de color a presentar y el observador deberá sólo cambiar la cantidad de luz del campo. Esta prueba hace más simple el procedimiento, ya que debido a las diferentes ruedas y botones del instrumento, en un observador con edad avanzada o de corta edad puede ser un poco complicado entender el procedimiento. Al realizar la prueba manual se simplifica la cantidad de botones que tiene que utilizar el observador para obtener un resultado fiable.

PUNTUACIÓN

El cociente de anomalía (AQ) se obtiene mediante una ecuación realizada por el instrumento, el resultado que se obtiene para la ecuación de promedio normal es: AQ: 1. El cálculo del cociente de anomalía es importante cuando el rango de igualación es grande, como

ocurre en muchos observadores con un defecto de visión del color y se utiliza, además de clasificar el tipo de defecto cromático, para la comparación de los resultados de estos defectos con otros anomaloscopios.

Según se cita en el manual del Anomaloscopio HMC, la clasificación de los defectos cromáticos mediante el AQ para la ecuación de Rayleigh es:

0 a <0.7	Protanómalo
0.7 a 1.4	Normal
1.4 a infinito	Deuteranómalo

En la ecuación de Moreland, como hemos descrito en apartados posteriores, con el Anomaloscopio HMC no es posible especificar el tipo de defecto tritán, por tanto el diagnóstico se debe realizar de forma subjetiva.

VALIDEZ

Mediante la ecuación de Rayleigh se obtiene el diagnóstico diferencial simple para tricrómatas deuteranómalos y protanómalos, observadores normales y dicrómatas protanopes y deuteranopes. También se realiza el diagnóstico de acromatopsia.

Mediante la ecuación de Moreland se obtiene el diagnóstico diferencial para defectos tritán, aunque solo se puede diferenciar entre un observador normal o anómalo. (Oculus. Instruction Manual HMC Anomaloskop MR).

V- METODOLOGÍA

5.1- ESTUDIOS PREVIOS

En la presente investigación se determinó la incidencia de defectos cromáticos en una población de 70 observadores. De todos los observadores que realizaron las pruebas de visión del color, sólo 5 presentaron algún defecto cromático.

Previamente al estudio se hizo un análisis y testeo del Anomaloscopio HMC para familiarizarse con el instrumento de medida. Para realizar el estudio se hicieron todas las pruebas disponibles y así, observar la existencia de alguna discrepancia entre los resultados obtenidos en las diferentes pruebas del mismo observador. En las pruebas previas, participaron dos observadores, el observador 1 no presentaba ningún defecto de visión del color mientras que el observador 2 presentaba un defecto de visión del color de tipo deután.

Tabla 5: Medidas realizadas con el Anomaloscopio HMC para obtener los AQ, M y R del observador 1 en la ecuación de Rayleigh.

Ecuación de Rayleigh	Primera medida		Segunda medida	
Prueba Manual	AQ	1.14	AQ	1.09
	M	37.6	M	38.4
Diagnóstico: Normal	R	14.5	R	14.1
Prueba de detección o screening	AQ	1	AQ	1
	M	40	M	40
Diagnóstico: Normal	R	14.9	R	14.9
Prueba específica Normal	AQ	1.16	AQ	1.02
	M	37.3	M	39.6
Diagnóstico: Normal	R	12.9	R	14.9
Prueba específica Deuteranomalía	AQ	1.32	AQ	1.12
	M	34.9	M	38
Diagnóstico: Normal	R	14.1	R	14.9
Prueba específica Deuteranopía	AQ	1.27	AQ	0.89
	M	35.7	M	42
Diagnóstico: Normal	R	15.3	R	16.1
Prueba específica Protanomalía	AQ	1.19	AQ	0.89
	M	36.9	M	42
Diagnóstico: Normal	R	15.7	R	15.7
Prueba específica Protanopía	AQ	1.27	AQ	1
	M	35.7	M	40
Diagnóstico: Normal	R	15.7	R	14.9

Al ver las diferentes pruebas realizadas por el observador, se puede distinguir diferencias en el resultado de los AQ, M y R.

El AQ oscilaba en un rango comprendido entre 0.89 y 1.32, en todas las pruebas se obtenía un cociente de anomalía dentro de la normalidad, esto queda presente en el diagnóstico hecho por el Anomaloscopio HMC. Aunque se hicieron las pruebas específicas de detección de los diferentes defectos de visión del color, el Anomaloscopio HMC fue capaz de hacer un diagnóstico de normalidad en un paciente sin anomalías. Como los observadores tipo tritán y deután son capaces de igualar el campo dentro de la zona normal, el Anomaloscopio HMC también realiza presentaciones dentro de esta zona en las pruebas específicas para anomalías y por tanto siempre se puede realizar un diagnóstico correcto de un observador normal. El instrumento empieza a evaluar las diferentes zonas del gráfico, pero es capaz de acotar el rango de igualación en la zona normal.

Tanto en las pruebas de tipo protán como deután, el Anomaloscopio HMC empieza a hacer un barrido en una zona comprendida en el rango de Protanopía (\pm entre 0/30 y 75/5) y Deuteranopía (\pm entre 0/15 y 75/15) respectivamente. El observador es incapaz de igualar ninguna ecuación de color y se reduce progresivamente el rango de igualación dirigiéndose hacia la zona central (zona normal), por tanto siempre se llega a un diagnóstico correcto en una persona sin defecto de visión del color.

En la tabla se aprecia un cambio en el rango de igualación de cada una de las pruebas. En la prueba de detección, el instrumento sólo nos muestra una medida, por tanto no se puede obtener un rango de anomalía. La prueba en la que se obtuvo el menor rango de igualación fue la prueba manual, el rango estaba contenido entre 37.6 y 38.4. El mayor rango fue el obtenido por la prueba específica de Deuteranopía en el que el rango osciló entre 35.7 y 42 en la mezcla de primarios.

Tabla 6: Medidas realizadas con el Anomaloscopio HMC para obtener los AQ, M y R del observador 1 en la ecuación de Moreland.

Ecuación de Moreland	Primera medida		Segunda medida	
Prueba Manual	AQ	1.02	AQ	0.85
	M	49.4	M	54.1
Diagnóstico: Normal	R	42	R	44.7
Prueba específica Normal	AQ	-	AQ	-
	M	-	M	-
Diagnóstico: (no consiguió igualar)	R	-	R	-
Prueba de detección	AQ	49	AQ	0.25
	M	2	M	80
Diagnóstico: No posible	R	16.5	R	62.7

En las igualaciones hechas por el observador en la ecuación de Moreland, se apreció una gran diferencia en las respuestas de las diferentes pruebas realizadas con el Anomaloscopio HMC.

El observador 1 no fue capaz de conseguir una igualación precisa del campo de color en ninguna presentación. En la prueba manual se le indicó al observador que intentara igualar al máximo posible las dos mitades, ya que no admitía ninguna igualación como exacta. Aún así se consiguió obtener un diagnóstico de normalidad: los AQ estaban comprendidos entre 1.02 y 0.85.

Con la prueba específica para observadores sin anomalía en la visión del color el observador no consiguió igualar ninguna presentación. Aunque el Anomaloscopio HMC hizo un barrido a través de la zona normal no se consiguió una igualación y por tanto no se obtuvo un diagnóstico.

Con la prueba de detección, el observador consiguió igualar en diferentes zonas del gráfico fuera del rango de normalidad. En la presentación del campo de color en la zona normal, el observador 1 no consiguió una igualación de los colores y el diagnóstico no se pudo realizar.

Tabla 7: Muestra las dos medidas realizadas en las diferentes pruebas con el Anomaloscopio HMC para obtener los AQ, M y R del observador 2 en la ecuación de Rayleigh.

Ecuación de Rayleigh	Primera medida	Segunda medida
Prueba Manual	AQ 4.4	AQ 3.3
Diagnóstico: Deuteranomalía	M 14.2	M 19.6
	R 14.9	R 16.1
Prueba de detección o screening	AQ 2.96	AQ 2.96
Diagnóstico: Deuteranomalía	M 21.2	M 21.2
	R 15.3	R 15.3
Prueba específica Normal	AQ -	AQ -
Diagnóstico: (no consiguió igualar)	M -	M -
	R -	R -
Prueba específica Deuteranomalía	AQ 5.65	AQ 3.04
Diagnóstico: Deuteranomalía	M 12.9	M 20.8
	R 15.3	R 14.5
Prueba específica Deuteranopía	AQ 4.28	AQ 2.26
Diagnóstico: Deuteranomalía	M 16.1	M 25.5
	R 16.1	R 14.1
Prueba específica Protanomalía	AQ -	AQ -
Diagnóstico: (no consiguió igualar)	M -	M -
	R -	R -
Prueba específica Protanopía	AQ 4.57	AQ 3.21
Diagnóstico: Deuteranomalía	M 15.3	M 20
	R 14.5	R 14.5

En los resultados obtenidos en las diferentes pruebas realizadas por el observador 2 se aprecia que existen diferencias relevantes.

En la prueba manual se obtuvieron unos AQ de 3.3 y 4.4 y un rango de igualación entre 14.2 y 16.1, por tanto el diagnóstico que se realizó fue de Deuteranomalía.

Al realizar la prueba de detección se obtuvo un AQ inferior, esto es debido a que sólo se realiza una presentación dentro del rango de Deuteranomalía. Además, esto hace que no se pueda obtener un rango de igualación.

Debido a que todas las presentaciones que se realizan en la prueba específica para observadores sin anomalías en la visión del color están en la zona normal, el observador 2 no consiguió realizar ninguna igualación del campo y no se obtuvo un diagnóstico.

En la prueba específica de Deuteranomalía se obtuvo unos AQ de 5.65 y 3.04 y un rango de igualación entre 12.9 y 20.8, con esta prueba se consigue un rango de igualación bien definido. El observador realiza igualaciones del color con el Anomaloscopio HMC en numerosas posiciones de la zona de anomalía: primero se empieza a evaluar un rango grande, con pasos que progresivamente van disminuyendo se reduce la zona hasta acotar el rango.

Con la prueba específica de Deuteranopía también se llegó a realizar un diagnóstico correcto. Aunque esta prueba realiza presentaciones a lo largo de todo el rango de la mezcla de primarios (zona deután), se consigue definir el rango de anomalía en la zona de Deuteranomalía debido a que el observador ve como diferentes las presentaciones fuera de esta zona. El Anomaloscopio HMC reduce progresivamente el rango de igualación hasta conseguir situarse sobre la zona del defecto en cuestión en esta zona.

En la prueba específica de Protanomalía no se consiguió una igualación de los colores. El Anomaloscopio sólo presenta estímulos alrededor de esta zona y por tanto el observador es incapaz de igualar el campo de presentación.

Con la prueba específica de Protanopía se consiguió llegar al diagnóstico de Deuteranomalía. Como las presentaciones en esta prueba se realizan en todo el rango de la mezcla de colores, es posible determinar el rango de igualación y el AQ del observador deután.

Tabla 8: Muestra las dos medidas realizadas en las diferentes pruebas con el Anomaloscopio HMC para obtener los AQ, M y R del observador 2 en la ecuación de Moreland.

Ecuación de Moreland	Primera medida		Segunda medida	
Prueba Manual	AQ	0.75	AQ	0.71
	M	57.3	M	58.4
Diagnóstico: Normal	R	48.2	R	48.2
Prueba específica Normal	AQ	1.04	AQ	0.82
	M	49	M	54.9
Diagnóstico: Normal	R	54.1	R	55.7
Prueba de detección	AQ	0.25	AQ	0.25
	M	80	M	80
Diagnóstico: No posible	R	62.4	R	62.6

En las igualaciones hechas por el observador en la ecuación de Moreland, se aprecia una gran diferencia en las respuestas de las diferentes pruebas hechas con el Anomaloscopio HMC. Aunque en la prueba manual y específica se pudo obtener un AQ y un rango de igualación normal, con la prueba de detección no se consiguió una igualación del color en esta zona.

Con la prueba de detección, el observador igualó el campo con un AQ de 0.25, por tanto se observa una gran diferencia en las respuestas dependiendo de la prueba empleada.

El hecho de que con el Anomaloscopio HMC no se pueda realizar un diagnóstico preciso al ser incapaz de diferenciar entre un tritanómalo y un tritanope, nos indica que esta prueba debería estar restringida a los sujetos que de verdad tengan alguna alteración azul-amarillo detectada con otro test de diagnóstico. Si utilizamos el Anomaloscopio HMC como primer test para diagnosticar estos tipos de alteraciones es probable que nos encontremos con ciertas dificultades para encontrar un diagnóstico fiable. Puesto que el gráfico sólo indica la zona específica de un observador normal y las zonas para un observador con sospecha de monocromatismo de conos azules, acromatopsia y una zona específica de glaucoma/diabetes, podremos obtener resultados incongruentes, que nos impida afirmar que el sujeto presenta una alteración. Este punto no ha podido ser comprobado debido a que la baja prevalencia de alteraciones azul-amarillo no nos ha permitido disponer de sujetos con estas condiciones.

5.2- OBSERVADORES DEL ESTUDIO

En el estudio tomaron parte 68 observadores de 1º y 2º curso de la diplomatura de Óptica y Optometría de la Universidad de Alicante y 2 pacientes en los que previamente se conocía la existencia de un defecto en la visión del color y un sujeto diabético. Las pruebas se realizaron en el OD de los observadores, ocluyendo el OI mediante un parche ya que es aconsejable administrar los test monocularmente puesto que las alteraciones de visión del color pueden no afectar a ambos ojos o no hacerlo en igual modo. Las pruebas se realizaron en el laboratorio de Óptica Fisiológica del Departamento de Óptica, Farmacología y Anatomía de la Universidad de Alicante durante los meses de Enero y Abril.

Se seleccionaron todo tipo de sujetos para realizar las pruebas sin ningún tipo de exclusión. Normalmente, la mayoría de los observadores no habían realizado ninguna prueba de visión del color previamente.

Para realizar las pruebas de visión del color se establecieron diferentes grupos de observadores. Dependiendo de las características visuales y de la posibilidad de ser citados en diferentes sesiones, se asignaron los siguientes grupos:

Grupo 1. Grupo de observadores sin anomalías cromáticas. 60 observadores. Prueba básica: Láminas de Ishihara, Anomaloscopio Davico, Anomaloscopio HMC (prueba manual: Rayleigh y Moreland)

Grupo 2. Grupo de observadores sin anomalías cromáticas. 5 observadores. Prueba completa: Láminas de Ishihara, Anomaloscopio Davico, FM 100-Hue, Anomaloscopio HMC (prueba manual, detección, específica)

Grupo 3. Grupo de observadores con anomalías cromáticas. 5 observadores. Prueba completa: Láminas de Ishihara, Anomaloscopio Davico, FM 100-Hue, Anomaloscopio HMC (prueba manual, detección, específica)

Las pruebas se realizaron durante varias sesiones en aquellos observadores con anomalías. También se citaron en diferentes sesiones los observadores del Grupo 2 para realizar las diferentes pruebas. En la primera sesión se realizaron las pruebas básicas a todos

los sujetos y las siguientes sesiones se realizó el FM-100 Hue y las pruebas de detección y específica con el Anomaloscopio HMC.

5.3- PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Las pruebas de discriminación cromática que utilizamos fueron las láminas de Ishihara, el Anomaloscopio Davico, el FM-100 Hue y el Anomaloscopio HMC.

La lectura de las láminas de Ishihara se hizo en una cabina de iluminación con iluminante D65 a una distancia de 50 cm en una sala oscura. Las láminas que fueron presentadas a los observadores fueron las láminas 1-25. El procedimiento consistía en leer los números contenidos en cada una de las láminas explicando la posibilidad de observar sólo un número, varios o ninguno. En la hoja de resultados apuntamos el número de errores de cada uno de los observadores.

Con el Anomaloscopio Davico las medidas fueron tomadas a una distancia de 40 cm en una sala oscura. Se realizaron 6 medidas de igualación del color, 3 medidas partiendo del verde y 3 medidas partiendo del rojo. Con estas 6 medidas se realizó la media y la desviación estándar para obtener la curva de respuesta de los observadores de estudio.

Con el FM-100 Hue la ordenación de los colores se hizo en una cabina de iluminación con iluminante D65 a una distancia de 50 cm, se dejó el tiempo requerido a cada sujeto para realizar la ordenación de las 4 combinaciones de colores.

Con el Anomaloscopio HMC las medidas fueron tomadas en una sala oscura, se realizaron diferentes pruebas dependiendo del observador

- con la ecuación de Rayleigh: Prueba manual, de detección y específica,
- con la ecuación de Moreland: Prueba manual, de detección y específica.

La tarea del observador era cambiar el tono y la iluminación del campo para intentar igualarlos. El observador debía intentar conseguir la igualación en brillo y color ajustando los colores de las dos semiesferas mediante los mandos del Anomaloscopio HMC. Con la rueda superior, el observador cambia el tono del campo superior y con la rueda inferior, se cambia la iluminación del campo inferior.

En la prueba manual, tanto Rojo-Verde (Rayleigh) como Azul-amarillo (Moreland), se realizaron varias medidas hasta encontrar los 2 puntos extremos del rango de igualación para obtener la zona de anomalía. En esta prueba se deben evaluar diferentes puntos de la mezcla de colores determinados por el examinador y el observador debe configurar los mandos de la prueba de tal manera que sólo tenga que cambiar la cantidad de luz hasta conseguir la igualación en el caso de que sea posible.

De esta manera se obtiene de una forma más fácil y eficaz el rango de igualación del observador. El examinador debe conocer sobre qué rango de la mezcla de color debe moverse dependiendo de la respuesta del observador, ya que éstas nos pueden dar conocimiento de la posición y tamaño del rango.

Si se empieza a evaluar sobre la zona de Deuteranomalía y vemos que es incapaz de conseguir igualar el campo puesto que percibe una gran diferencia entre los dos colores, debemos saber que hay que posicionar el estímulo de igualación en un punto más central, más cerca de la zona normal. A continuación se debe evaluar la zona contraria (zona de Protanomalía) y el observador deberá intentar conseguir igualar de nuevo. Si no es capaz de igualar, tendremos que reducir entonces el rango para obtener el rango máximo en el que es capaz de igualar. Se debe conseguir que el rango de igualación coincida con la zona en la que el observador confunde los colores.

Si el observador consigue igualar los colores sobre determinada zona de la mezcla de color, habrá que centrarse en analizar el rango de igualación alrededor de dicha zona. De esta forma se determina si existe alguna anomalía en la percepción de los colores, o si simplemente el punto de igualación del observador se encuentra dentro de la zona de normalidad con una baja discriminación cromática.

Si después de realizar la prueba, el Anomaloscopio HMC nos indica que existe un defecto de visión del color, se deberán realizar las pruebas específicas para obtener de una forma más precisa el AQ y el rango de igualación.

Mediante la prueba específica, el Anomaloscopio HMC es capaz de indicarnos el defecto de visión de color del observador, sin embargo, debido a que se puede variar la

iluminación (R), puede ser que la igualación se realice en un punto inferior o superior a cualquier zona de anomalía, por tanto el examinador deberá ser capaz de hacer un diagnóstico subjetivo del posible defecto si el instrumento no es capaz de diagnosticar.

5.4- ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE DATOS

Para la realización del análisis estadístico utilizamos la hoja de cálculo Excel y el software Matlab © 6.5. En todos los casos consideramos un valor de significatividad del 95 %.

Con las láminas de Ishihara se evaluó el promedio y la desviación estándar para los 3 grupos de observadores. Además, se procedió a obtener para el grupo 1 la medida de la forma o apuntamiento de la distribución (curtosis, g_2) y así estudiar la mayor o menor concentración de frecuencias alrededor de la media y en la zona central de la distribución.

Tomando la distribución normal como referencia, una distribución puede ser:

- Más apuntada que la normal es leptocúrtica.($g_2 > 0$)
- Menos apuntada que la normal es platicúrtica.($g_2 < 0$)
- La distribución normal es mesocúrtica.($g_2 = 0$)

Con el Anomaloscopio Davico se estudiaron los puntos de igualación promedio y la desviación estándar de cada uno de los 3 grupos de observadores. Otro parámetro estudiado fue la curtosis de las 6 igualaciones de color hechas por los observadores del grupo 1. Mediante el análisis ANOVA se estudió la igualdad de diferentes medias poblacionales analizando las varianzas de las muestras. Debido a la alta varianza en los resultados del grupo 1, se procedió a realizar un análisis ANOVA con un punto de igualación dentro del rango de igualación considerado normal (65-75). De esta forma se obtuvo un análisis de la varianza de resultados en las 6 igualaciones de color de cada sujeto con el Anomaloscopio.

También se estudió el promedio y la desviación estándar que consideramos como normal cuando es ≤ 5 debido a que el rango de igualación normal oscila entre 65 y 75.

Por último, con el Anomaloscio HMC se realizó el promedio y la desviación estándar de los AQ y los rangos de igualación en la ecuación de Rayleigh. Sin embargo debido a los pocos datos obtenidos con la ecuación de Moreland por la dificultad en conseguir una igualación de color, no fue posible realizar un estudio estadístico de datos.

VI- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

GRUPO 1

ISHIHARA

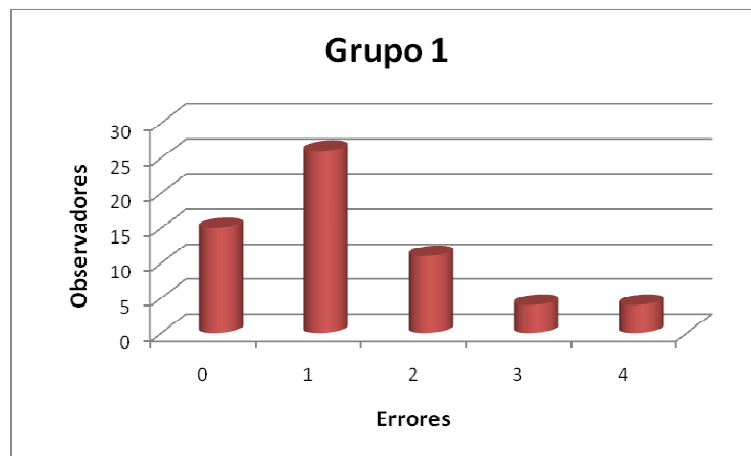


Figura 13: Número de errores cometidos con las láminas de Ishihara por los observadores del Grupo 1.

Como se puede comprobar en el gráfico, con las láminas de Ishihara existen diferencias en las cantidades de errores en la lectura de éstas. El mayor número de personas cometieron 1 error. Por el gráfico podemos ver que se cumple la distribución en forma de campana, con el máximo de respuestas en 1. Tal como nos dice el valor de curtosis (0.4611), todos los resultados obtenidos por los observadores del grupo 1 se encuentran dentro del rango de normalidad y la distribución es leptocúrtica, pues presenta una distribución más apuntada que la normal (>0).

El promedio de errores es de 1.3 ± 1.1 .

Las láminas que obtuvieron el mayor número de errores fueron las siguientes:

Lámina 12: 23 observadores (38.33%) leyeron incorrectamente el número 97.

Lámina 17: 17 observadores (28.33%) leyeron incorrectamente el número 73.

Lámina 4: 6 observadores (10%) leyeron incorrectamente el número 29.

ANOMALOSCOPIO DAVICO

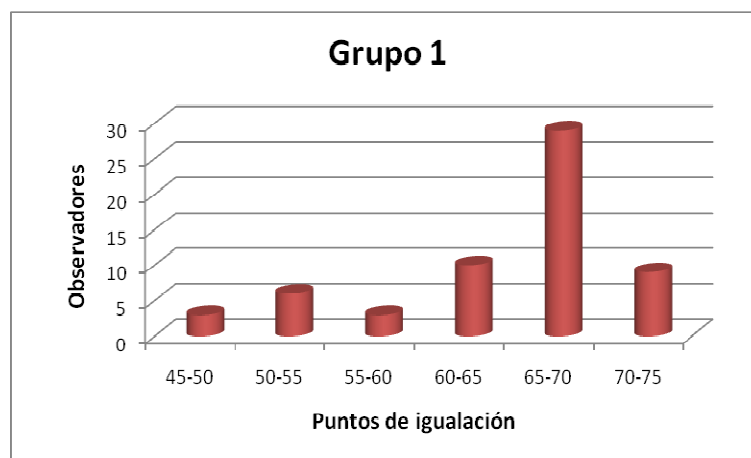


Figura 14: Puntos de igualación promedios de los observadores del grupo 1 con el Anomaloscopio Davico.

Se observa que el mayor número de personas tiene un punto de igualación promedio dentro de la normalidad (contenido entre 65-75). Un número no despreciable de sujetos han obtenido puntos de igualación fuera de la zona normal, lo que en principio llevaría a clasificarlos dentro de algunos grupos de anomalías o deficiencias.

El promedio y la desviación estándar de los puntos de igualación del grupo 1 es de 65 ± 7 . Según los criterios de diagnóstico del Anomaloscopio Davico y según los criterios de normalidad (70 ± 5) podemos asumir que la varianza de los puntos de igualación del grupo oscila en un rango superior.

El valor de curtosis obtenido fue de 0.607 y según nos indica el valor, se obtiene una distribución más apuntada que la normal, leptocúrtica ($g_2 > 0$).

Los resultados obtenidos indican que existen 22 observadores (36.67%) con un punto de igualación fuera del rango de normalidad proporcionado por el Anomaloscopio Davico. De estos 22 observadores, 9 sujetos se situaron por debajo de 55 y una desviación estándar ≥ 5 . Atendiendo a estos criterios y según el Anomaloscopio Davico, estos observadores se deberían clasificar como sujetos con un defecto tipo protán. Quizá es debido a que no han entendido correctamente las instrucciones del test, pero podremos afirmarlo al comparar los datos con las otras pruebas.

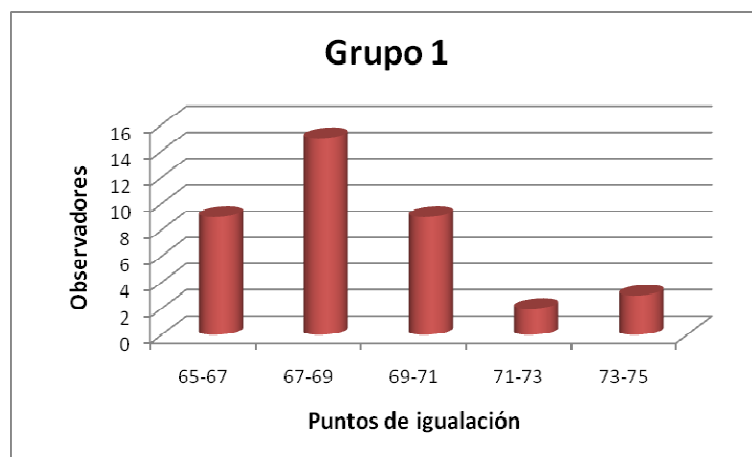


Figura 15: Puntos de igualación promedios de los observadores del grupo 1 comprendidos en el rango 65-75 con el Anomaloscopio Davico.

Tomando en cuenta únicamente las respuestas de los observadores que obtuvieron un punto de igualación promedio dentro del rango considerado como normal por el Anomaloscopio Davico (65-75), se obtiene un promedio y una desviación estándar de 69 ± 2 . Según los criterios de normalidad (varianza ≤ 5) podemos asumir que el promedio de las respuestas de los observadores se encuentra dentro de la normalidad y podemos considerar que ningún observador con puntos de igualación dentro del rango normal presenta una baja discriminación de los colores.

Se realizó el análisis de varianza (ANOVA) para determinar una razón de las diferencias observadas (margen de error) y comprobar la hipótesis de normalidad. Con esto se determina la varianza de las medias de los grupos como una medida de las diferencias observadas entre ellos y poder verificar la diferencia entre las medias de los observadores.

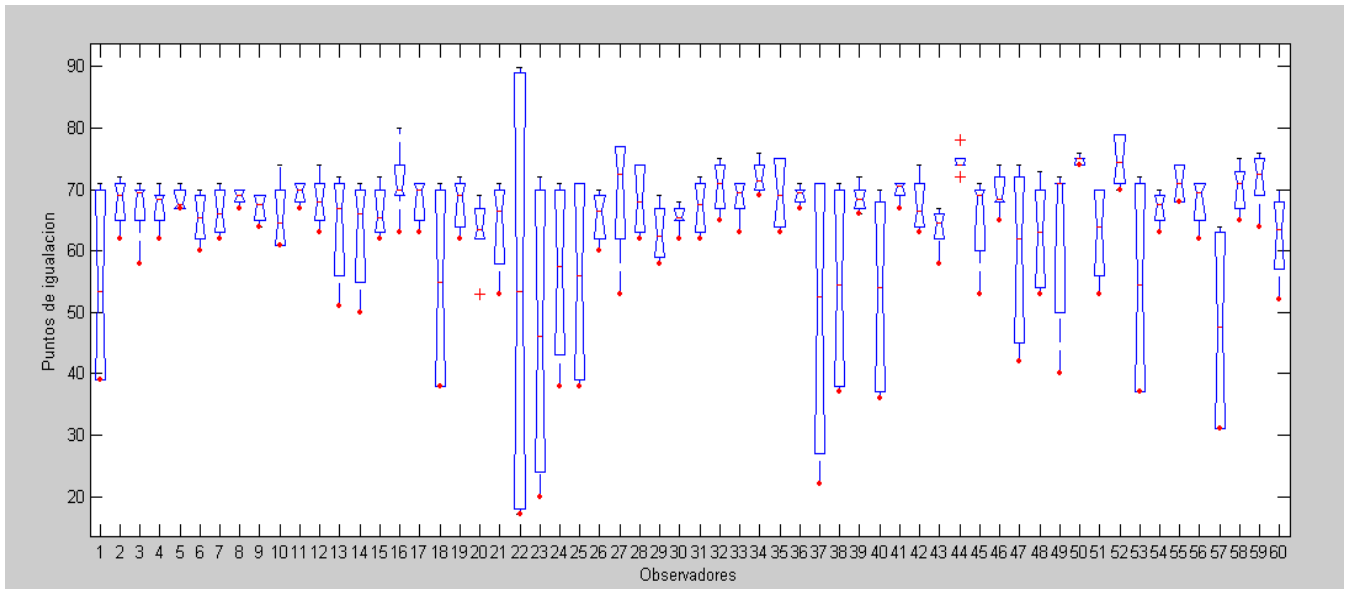


Figura 16: Análisis ANOVA para el grupo 1.

Como observamos en el gráfico, existe una gran variabilidad en los resultados de los puntos de igualación promedios y los rangos de igualación de este grupo de observadores. El p-valor que hemos obtenido con el análisis ANOVA para las respuestas de los observadores con el Anomaloscopio Davico es de $2.43 \cdot 10^{-7}$, por tanto como $p\text{-valor} < 0.05$ podemos rechazar la hipótesis nula, las medias de los puntos de igualación presentan diferencias estadísticamente significativas.

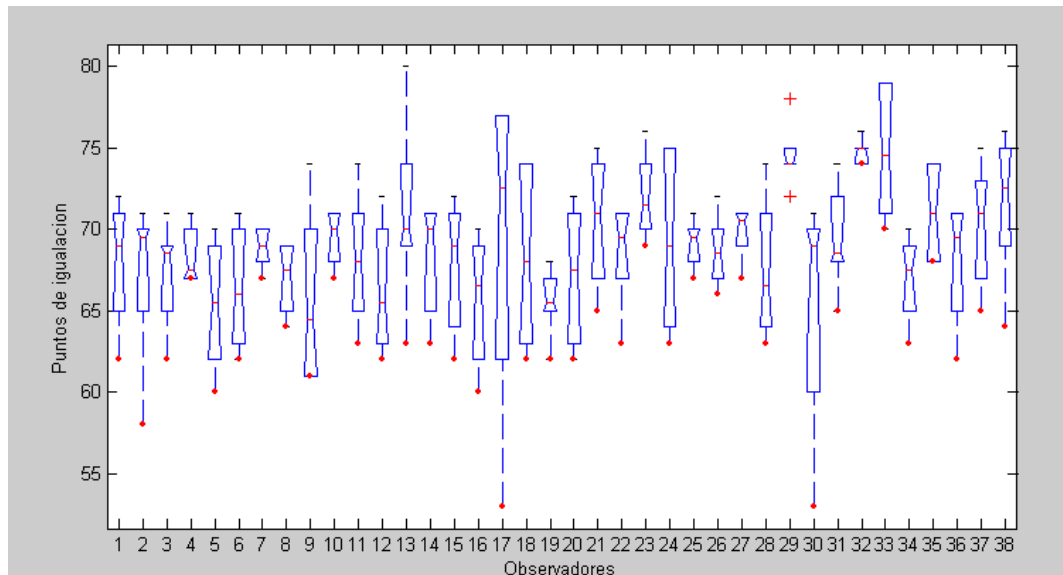


Figura 17: Análisis de varianza (ANOVA) para determinar una razón de las diferencias observadas (margen de error) y comprobar la hipótesis de normalidad en los observadores del grupo 1 con un punto de igualación promedio dentro del rango normal.

Analizando sólo los datos de los observadores que obtuvieron un punto de igualación promedio dentro del rango comprendido entre 65 y 75, el p-valor que hemos obtenido con el análisis ANOVA es de 4.10^{-4} . Al ser $p\text{-valor} < 0.05$ podemos rechazar la hipótesis nula, las medias de nuevo presentan diferencias estadísticamente significativas.

En este grupo (38 observadores), 2 sujetos realizaron una medida inferior a 55 y 2 realizaron una medida superior a 75. Esto puede ser debido simplemente a la falta de atención en alguna de las 6 igualaciones de color o a que su discriminación de color está disminuida. Por la comparación de los resultados de estos 4 observadores con otras pruebas de color, incluidas el Anomaloscopia Davico, se llegó a la conclusión de que no presentaban baja discriminación del color.

ANOMALOSCOPIO HMC

Debido al estudio de las diferentes ecuaciones cromáticas disponibles, se ha estudiado los AQ y los rangos de igualación en cada una de ellas para los diferentes grupos de estudio y de esta manera obtener en nuestra población general las zonas de igualación en la mezcla para cada tipo de ecuación.

Para la ecuación de Rayleigh, el promedio de los AQ para los 60 observadores fue de: 0.98 ± 0.12 . Con esto, se obtiene que para nuestra población de estudio, el AQ se encuentra dentro del rango considerado por el Anomaloscopio HMC como normal (0.7-1.4).

Por otro lado se ha estudiado el promedio del rango de igualación que en nuestra población es de: 1 ± 2 . Puesto que no tenemos ningún dato teórico que indique el rango de igualación de la ecuación de Rayleigh para una población normal, tomaremos como referencia el promedio de los rangos de igualación y la desviación estándar de nuestra población de 60 sujetos para comparar los resultados de los análisis de los diferentes grupos de estudio en nuestro trabajo. De esta manera podremos comparar los resultados ante diferentes sujetos con un defecto cromático y observar las diferencias de los diferentes parámetros.

Como describiremos de manera más detallada posteriormente, con la ecuación de Moreland no se pudo obtener un rango de igualación porque había una gran dificultad en la igualación los colores del campo en un gran número de observadores. Esto supuso la imposibilidad de obtener un AQ y un punto de igualación promedio en la población de estudio. A pesar de los problemas obtenidos en las medidas, se pudo obtener una medida de AQ para cada uno de los sujetos y la media de todos los cocientes fue de: 0.9 ± 0.3 . Esto nos indica que aunque existan problemas para realizar varias medidas fiables, el AQ obtenido oscila alrededor del cociente considerado normal en la ecuación de Moreland ($AQ=1$).

GRUPO 2

ISHIHARA

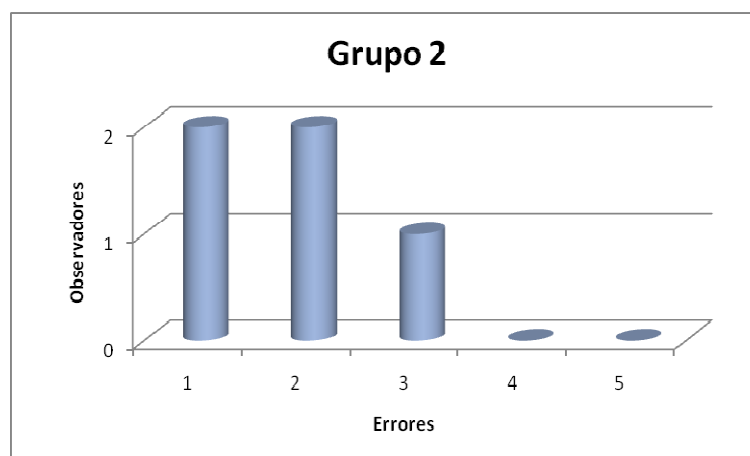


Figura 18: Número de errores realizados por los observadores del grupo 2 con las láminas de Ishihara.

El gráfico nos muestra que en el grupo de personas sin anomalía de visión cromática, el número de errores realizados se encuentran dentro del rango de normalidad. Como se puede comprobar, oscilan entre 1 y 3 lecturas erróneas. El mayor número de personas cometieron 1 error.

El promedio de errores es de 0.8 ± 0.8 .

ANOMALOSCOPIO DAVICO

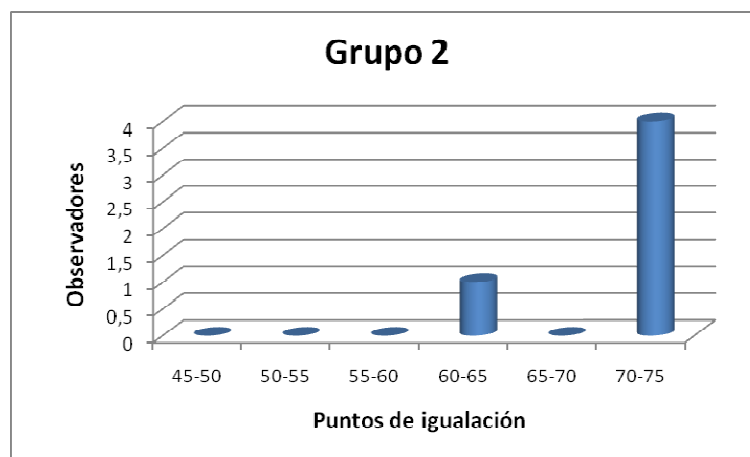


Figura 19: Puntos de igualación promedios de los observadores del grupo 2 con el Anomaloscopio Davico.

En el gráfico se muestra que 1 sujeto tuvo un punto de igualación entre el rango 60-65 y 4 sujetos tuvieron un punto de igualación promedio en la ecuación de color dentro del rango de 65-75 con el Anomaloscopio Davico.

Tabla 9: Clasificación según Punto de igualación y desviación estándar para los observadores del grupo 2.

Observador	Promedio P.igualación	Desviación estándar
N1	71	2
N2	71	2
N3	71	3
N4	71	7
N5	63	9

Fijándonos en el punto de igualación promedio, el observador N5 tiene un promedio ligeramente inferior al rango considerado normal, además la desviación estándar es superior a la establecida como normal (incluyendo la zona de igualación normal), éste podría ser un observador con una discriminación de los colores ligeramente disminuida. El resto de los observadores obtuvieron un punto de igualación y una desviación estándar considerado como normal.

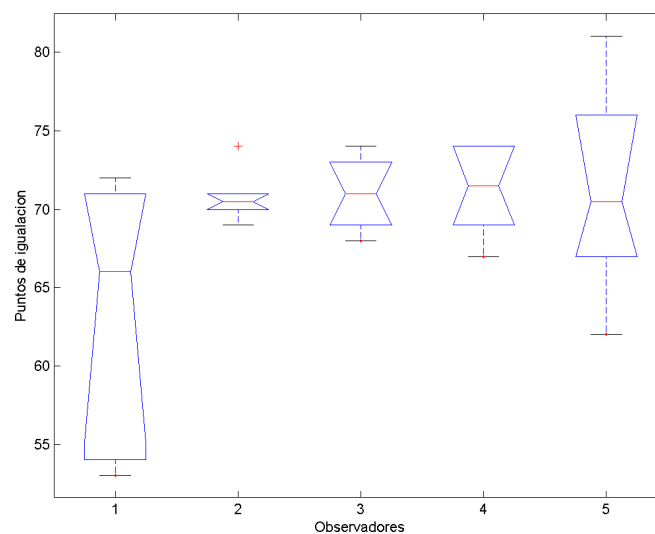
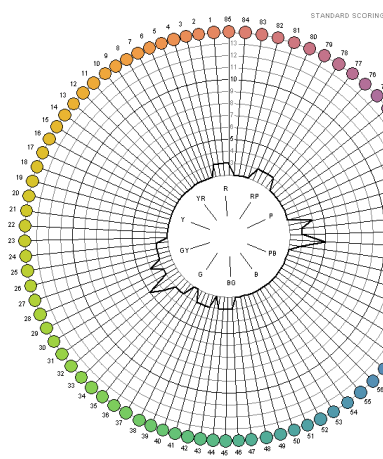


Figura 20: Análisis de varianza (ANOVA) para determinar una razón de las diferencias observadas (margen de error) y comprobar la hipótesis de normalidad en los observadores del grupo 2.

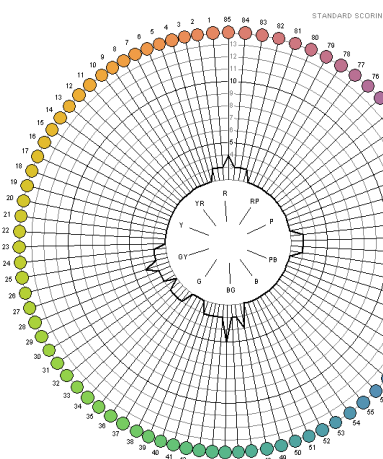
El p-valor obtenido con el análisis ANOVA para las respuestas del Anomaloscopio Davico es de 0.08, como $p\text{-valor} > 0.05$ no podemos rechazar la hipótesis nula, las diferencias entre los 5 sujetos no son estadísticamente significativas.

FM-100 HUE

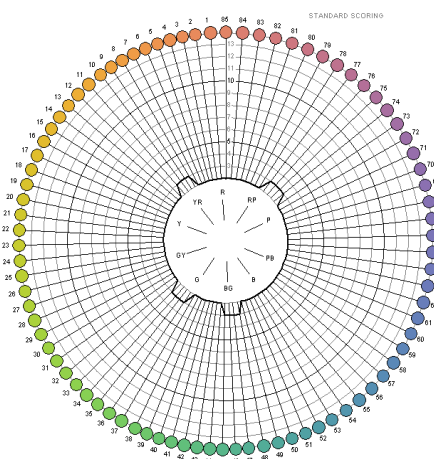
Debido a las especiales características de esta prueba, no es posible la realización de su análisis estadístico o incluso el habitual promedio. Los resultados de cada sujeto deben ser analizados por separado basándose en las zonas donde se ha cometido el mayor número de errores de ordenación.



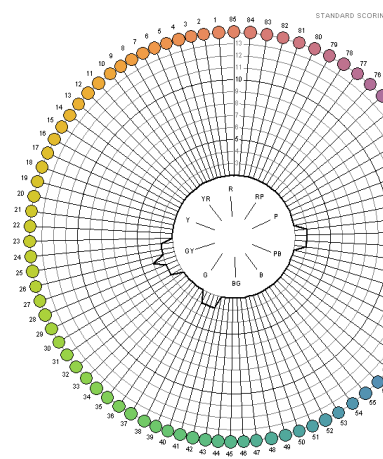
Observador N1: Error total 40



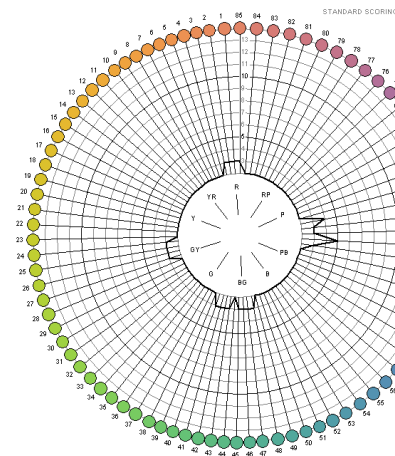
Observador N2: Error total 36



Observador N3: Error total 16



Observador N4: Error total 16



Observador N5: Error total 24

Figura 21: Gráficos FM 100-Hue para el grupo 2. Se especifican el error total obtenido por cada observador.

Según los gráficos, cada observador presenta un patrón característico diferente con un número de errores bajo y por tanto con esta prueba no se puede considerar que ningún sujeto tenga un defecto de visión del color.

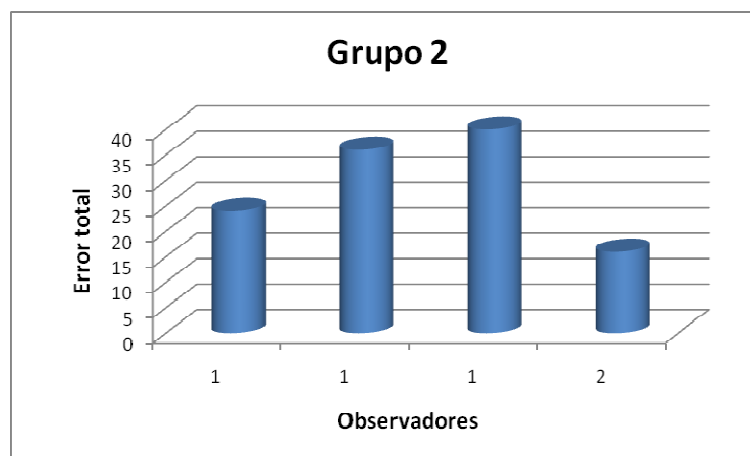


Figura 22: Se muestra el error total obtenido por los observadores del grupo 2 en la prueba de ordenación FM-100 Hue.

En el gráfico se observa que el número máximo de errores obtenidos por el grupo de sujetos sin anomalía cromática fue de 40. El número mínimo de errores cometidos fue 16, este último fue obtenido por 2 observadores.

ANOMALOSCOPIO HMC

Tabla 10: AQ y rangos de igualación en la ecuación de Rayleigh con sus desviaciones estándar en cada una de las pruebas (manual y específica) para el grupo 2.

Observadores	Prueba manual		Prueba específica		Diagnóstico
	AQ promedio	Rango igualación	AQ promedio	Rango igualación	
N1	0.95	0.6	0.97	1.7	Normal
N2	0.97	0.6	1.25	8.3	Normal
N3	1.08	0.55	1.10	6.8	Normal
N4	1.16	1.75	1.14	8	Normal
N5	0.98	0.4	1.04	1.1	Normal
Promedio	1.0 ± 0.1	0.8 ± 0.5	1.1 ± 0.1	5 ± 4	

Si comparamos los resultados con los datos obtenidos en el grupo 1 de nuestro estudio, observamos que el AQ que hemos obtenido en la prueba manual y específica oscilan dentro del rango 0.98 ± 0.12 .

Otro dato que hemos analizado es el rango de igualación, si nos fijamos en los datos de la Tabla 10 vemos que con la prueba manual, éste fue de 0.8 ± 0.5 y por tanto está dentro del rango obtenido para la población del grupo 1 (1 ± 2). Sin embargo, el rango de igualación obtenido con la prueba específica es de 5 ± 4 .

Tabla 11: AQ y diagnósticos en la ecuación de Moreland para el grupo 2.

Observadores	AQ	Diagnóstico
N1	0.75	No posible
N2	0.41	No posible
N3	0.55	No posible
N4	0.8	No posible
N5	0.9	Normal

Como queda presente, en la tabla se muestra que de los 5 sujetos del grupo 2, sólo el observador N5 fue capaz de conseguir realizar una igualación dentro de la zona normal, por tanto el Anomaloscopio no fue capaz de realizar un diagnóstico en el resto de sujetos.

GRUPO 3

ISHIHARA

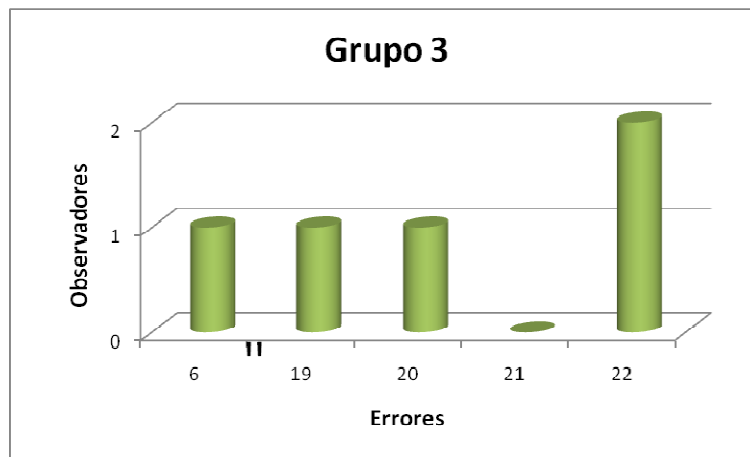


Figura 23: Número de errores realizados por los observadores del grupo 3 con las láminas de Ishihara.

En el gráfico se observa que existe un incremento del número de errores obtenidos con respecto a los grupos 1 y 2. Por tanto, según las pruebas de las láminas de Ishihara e independientemente del tipo de anomalía cromática se puede afirmar que existe una anomalía en la discriminación de los colores en los 5 observadores. El número de errores promedio fue de 18 ± 7 .

Tabla 12: Respuesta de los observadores del Grupo 3 a las láminas destinadas a la clasificación de la anomalía cromática. Entre paréntesis se muestran las respuestas de los números que han sido difíciles de detectar. La X indica que no se ha podido detectar ningún número en la lámina.

Observadores	Números contenidos en las láminas				Diagnóstico Ishihara
	2 / 6	4 / 2	3 / 5	9 / 6	
A1	2	4	3	9	Deuteranomalía Fuerte
A2	2	4	9	9	Deuteranomalía Fuerte
A3	2(6)	4(2)	3(5)	9(6)	Deuteranomalía Leve
A4	2	4	3	9	Deuteranomalía Fuerte
A5	X	X	3	9	Deuteranomalía Fuerte

Como indica la tabla 12, el observador A3 fue capaz de leer todos los números de las 4 láminas, sin embargo los presentados entre paréntesis, aunque se leyeron correctamente fueron difíciles de detectar, esto indica que puede ser un sujeto Deuteranómalo leve. De los 5 sujetos, 3 fueron capaces de leer correctamente los números 2,4,3 y 9 pero no pudieron detectar los números 6,2,5 y 6. Por último, 1 observador fue incapaz de leer correctamente los números 2,4,3 y 9, que son los números que un sujeto tipo tritán leve es capaz de leer. Según nos indican las láminas, puede un sujeto Deuteranómalo extremo o Deuteranope aunque para poder clasificar la gravedad del defecto, se deben comparar los resultados de las láminas de Ishihara con el resto de pruebas.

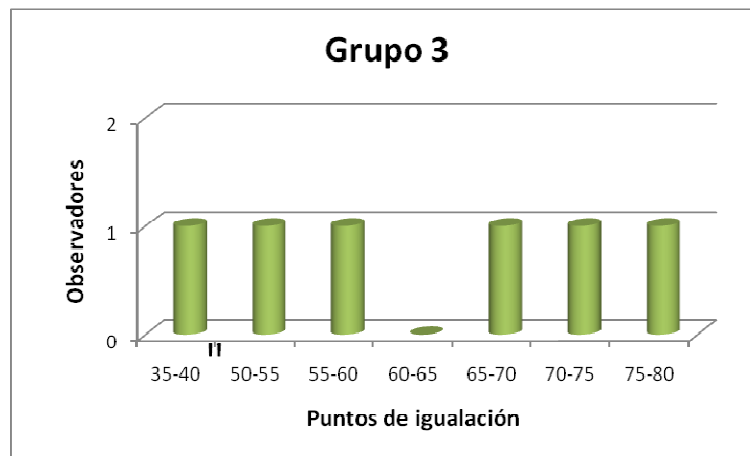
ANOMALOSCOPIO DAVICO

Figura 24: Puntos de igualación promedios de los observadores del grupo 3 con el Anomaloscopio Davico.

En el gráfico se observa que se obtuvo una gran variedad de puntos de igualación con el Anomaloscopio Davico que no guardan relación con los resultados de las láminas de Ishihara.

Tabla 13: Clasificación según Punto de igualación y desviación estándar para el grupo 3.

Observadores	Promedio P. igualación	Desviación estándar	Diagnóstico Anomaloscopio
A1	71	5	Normal
A2	57	6	Protanomalía
A3	79	4	Deuteranomalía
A4	66	16	Protanomalía
A5	36	14	Protanomalía

Como indican los resultados de la tabla 13, sólo el observador A1 obtuvo un punto de igualación promedio y una desviación estándar dentro del rango normal. Según el Anomaloscopio Davico, el observador A3 presenta un punto de igualación que puede indicar un defecto tipo deután y el resto de observadores obtuvieron un punto de igualación característico del tipo de defecto protán con desviaciones estándar altas que nos llevan a pensar que tienen una baja discriminación de los colores.

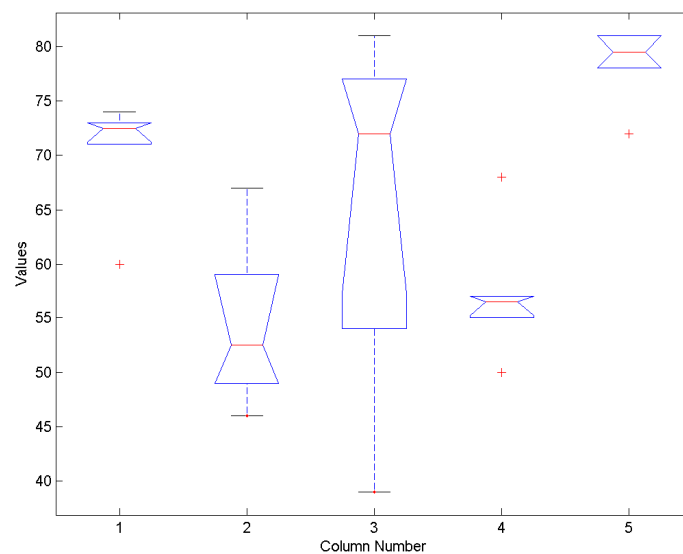
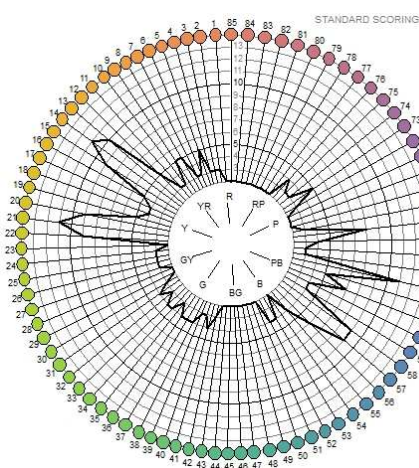


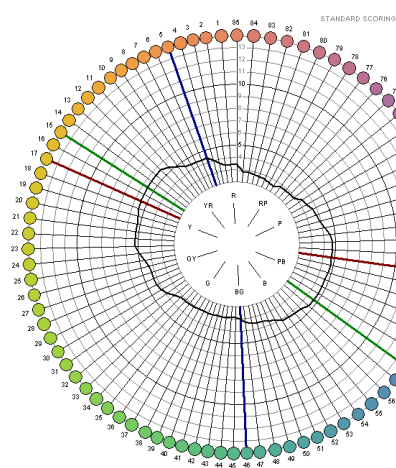
Figura 25: Análisis de varianza (ANOVA) para determinar una razón de las diferencias observadas (margen de error) y comprobar la hipótesis de normalidad en los observadores del grupo 3.

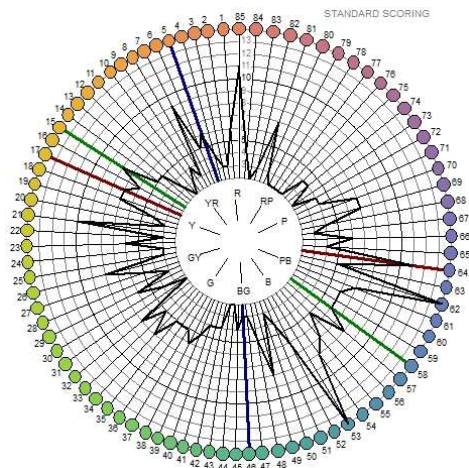
En el análisis ANOVA del grupo 3 se obtuvo un $p\text{-valor} = 4.73 \cdot 10^{-4}$. Como $p\text{-valor} < 0.05$ podemos rechazar la hipótesis nula, las diferencias entre los puntos de igualación promedios son estadísticamente significativas.

FM-100 HUE

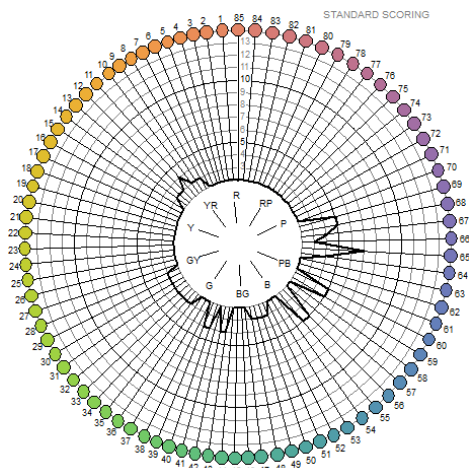
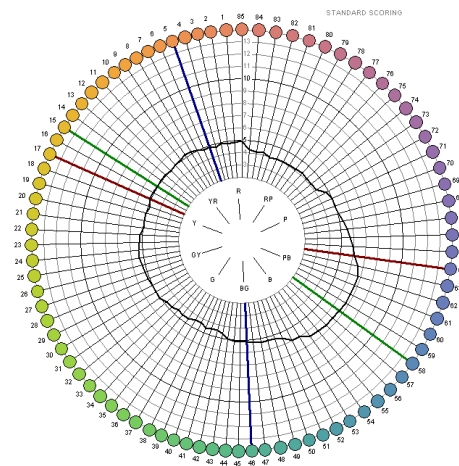


Observador A1: Error total 164

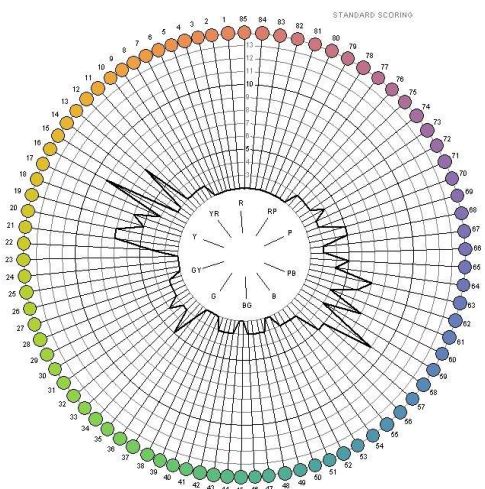
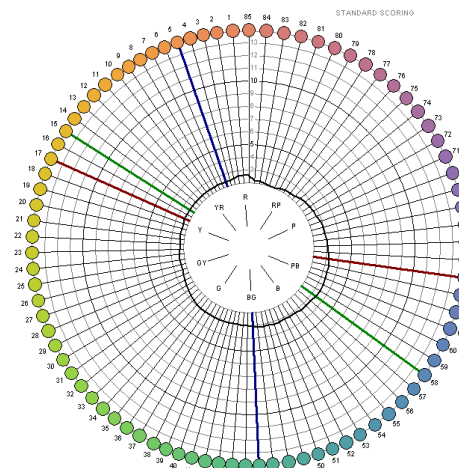




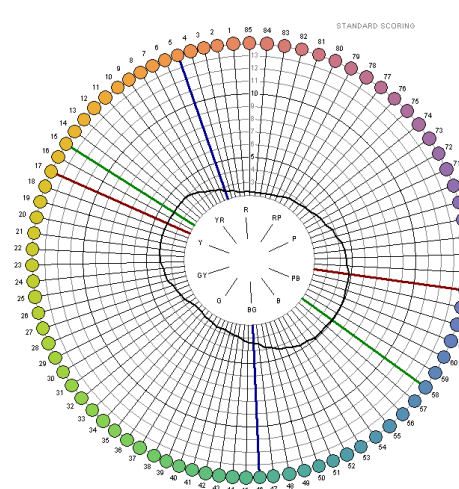
Observador A2: Error total 260

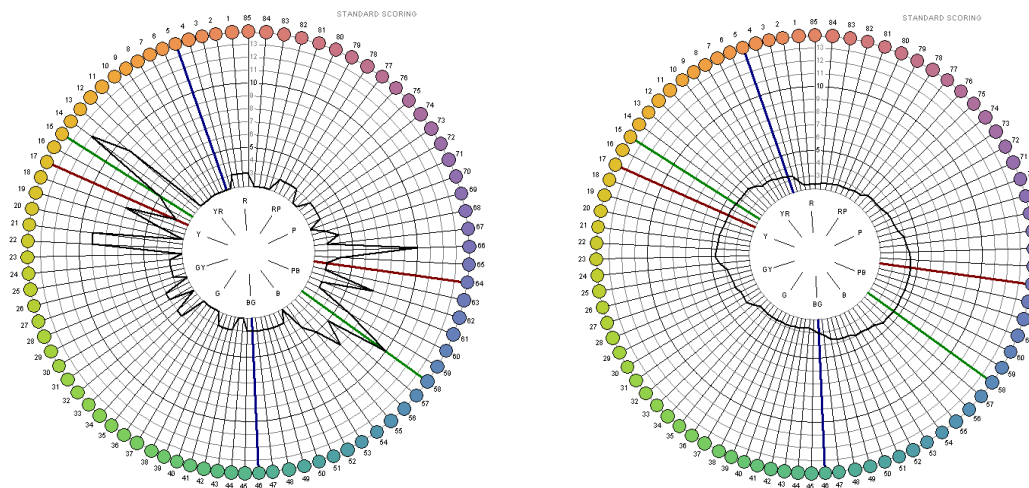


Observador A3: Error total 60



Observador A4: Error total 116





Observador A6: Error total 128

Figura 26: Gráficos FM-100 Hue para el grupo 3. Se especifican el error total obtenido por cada observador. Para observar el eje de máxima pérdida de discriminación y valorar de una manera más acertada el diagnóstico del FM-100 Hue, a la derecha de cada figura se muestra el gráfico tras aplicarle un filtro de suavizado.

Debido a que el software del FM-100 Hue no realiza un diagnóstico objetivo, se precedió a realizar una valoración subjetiva de los patrones de cada uno de los sujetos del grupo 3 representados en la figura 26. Todos ellos quedan resumidos en la siguiente tabla.

Tabla 14: Valoración subjetiva de los patrones FM-100 Hue para el grupo 3.

Observador	Eje de máxima pérdida	Valoración con FM-100 Hue
A1	15-60	Deuteranomalía extrema/Deuteranopía
A2	-	Baja discriminación cromática
A3	-	Normal
A4	15-59	Deuteranomalía
A5	16-58	Deuteranomalía extrema/Deuteranopía

Aunque con las pruebas realizadas anteriormente a los sujetos anómalos se observa que todos ellos tienen algún tipo de defecto cromático o en el caso más favorable una baja discriminación, con el FM-100 Hue no se pudo obtener un patrón característico en el observador A3. Mediante esta prueba este sujeto podría pasar como un observador normal debido a que la cantidad de errores fue mínima. Sin embargo, en 3 de los 5 observadores anómalos se pudo obtener un diagnóstico de tipo deután alrededor de un eje en particular

Atendiendo a los resultados para el observador A2 se ha llegado a la conclusión de que no es recomendable realizar la prueba en observadores de corta edad. El observador A2 era un sujeto de 8 años que debido a la posible mala comprensión de la prueba o a la poca concentración, proporcionó unos resultados en los que no se distingue ningún patrón característico de una anomalía tipo deután, protán o tritán. El patrón obtenido es el típico de un observador con afectación de los medios oculares debido a una posible diabetes, ya que la sensibilidad de todos los fotorreceptores disminuye de forma proporcional y se obtienen estos picos característicos a lo largo de toda la esfera de tonos. Para intentar determinar un patrón característico quizá se tendría que haber dado un tiempo de aprendizaje al observador para obtener una mejor fluidez en la realización de la tarea.



Figura 27: Se muestra el error total obtenido por cada observador del grupo 3 en la prueba de ordenación FM-100 Hue.

En el gráfico de la figura 27 encontramos que existe un número elevado de errores obtenidos por cada uno de los sujetos del grupo 3. El número de errores cometidos oscilaba entre 54 y 260. Por tanto, según la prueba, los sujetos presentan anomalía de visión del color debido a un número de errores elevado.

ANOMALOSCOPIO HMC

Tabla 15: Resultados y diagnóstico de la prueba manual para cada observador del grupo 3 en la ecuación de Rayleigh.

Observadores	Prueba manual				Diagnóstico
	AQ 1	AQ 2	M 1	M 2	
A1	3.13	0.12	20.4	66.3	No posible
A2	infinito	1.35	0	34.5	Deut. extrema
A3	3.4	3.3	19.2	19.6	Deuteranomalía
A4	infinito	0.01	0	72.5	Deuteranope
A5	4.02	0.12	16.9	66.3	Deut. extrema

Con esta prueba, el único observador en el que no se pudo obtener un diagnóstico fue el sujeto A1 debido a que la cantidad de luz de la mezcla que el sujeto necesitó para igualar el campo hizo que el punto de igualación se saliera de la zona de diagnóstico.

Tabla 16: Resultados y diagnóstico de la prueba de detección para cada observador del grupo 3 en la ecuación de Rayleigh.

Observadores	Prueba específica				Diagnóstico
	AQ 1	AQ 2	M 1	M 2	
A1	infinito	0	0	72.9	Deuteranopía
A2	infinito	0	0,42	54.1	No posible
A3	2.96	-	21.2	-	Deuteranomalía
A4	infinito	0	0	72.9	Deuteranopía
A5	infinito	0.42	0	54.1	No posible

Como el rango de igualación del observador A3 es relativamente pequeño, con la prueba de detección sólo se obtuvo un valor de AQ. Debido a que los observadores A2 y A5 realizaron algunas igualaciones fuera de cualquier zona de anomalía, no se obtuvo un diagnóstico. Fijándonos en los AQ se aprecia que éstos son muy superiores a 1 y por tanto podemos interpretarlos como sujetos deuteranómalos extremos o deuteranopes.

Tabla 17: Resultados y diagnóstico de la prueba específica para cada observador del grupo 3 en la ecuación de Rayleigh.

Observadores	Prueba manual				Diagnóstico
	AQ 1	AQ 2	M 1	M 2	
A1	infinito	0.11	0	67.1	Deuteranopía
A2	43.03	0.91	2	41.6	No posible
A3	5.66	3.08	12.9	20.6	Deuteranomalía
A4	Infinito	0.01	0	72.5	Deuteranopía
A5	Infinito	0.09	0	68.2	No posible

Como podemos observar en las anteriores tablas, existen diferentes diagnósticos para un mismo sujeto dependiendo del tipo de prueba utilizada. Como el método de igualación con el Anomaloscopio HMC no deja de ser una prueba subjetiva, pueden existir diferencias de diagnóstico.

A pesar de esto, se observa que el resultado en cada sujeto guarda una clara relación con un defecto tipo deután, llegando en algunos casos a ser detectados como Deuteranopía. Podemos afirmar que los resultados deben ser valorados objetivamente por el examinador que debe de ser capaz de interpretar las pruebas dependiendo de las zonas donde el sujeto haya sido capaz de conseguir una igualación del color. Otro punto imprescindible es la comparación de los resultados con otras pruebas de visión cromática que nos ayuden a obtener un resultado correcto.

Tabla 18: Se muestran los resultados y el diagnóstico de la prueba manual para cada observador del grupo 3 en la ecuación de Moreland.

Observadores	AQ	Diagnóstico
A1	0.82	No posible
A2	0.82	No posible
A3	0.24	No posible
A4	5.71	No posible
A5	0.76	No posible

Al realizar las pruebas de igualación con la ecuación de Moreland, al igual que en los diferentes grupos de estudio, se han tenido problemas para conseguir una igualación exacta. En el caso del Grupo 3, ningún observador consiguió una igualación del campo dentro de la zona normal y no se pudo realizar un diagnóstico.

Problemas encontrados con el examen de Moreland (prueba manual)

El Anomaloscopio HMC comienza haciendo una presentación dentro de la zona normal, por tanto para un observador sin anomalías en la visión del color un ligero reajuste del tono y del brillo debe ser suficiente para conseguir la igualación. Esto contrasta con los resultados de las pruebas obtenidas. Como el AQ promedio obtenido de los 50 observadores del grupo 1 que consiguieron igualar el campo en 2 ocasiones con la ecuación de Moreland fue de 0.9 ± 0.2 , consideramos como normal los AQ dentro de este rango para el estudio de las poblaciones 2 y 3.

En el estudio, 50 observadores consiguieron una igualación del campo y 44 de ellos consiguieron una igualación dentro del rango normal (0.7 y 1.1) en la primera igualación. Al realizar una segunda igualación, es el examinador quien debe cambiar la zona de igualación puesto que el dispositivo no cambia la posición del punto de igualación de la mezcla de colores. De estos 50 sujetos, 10 fueron incapaces de conseguir una segunda igualación del campo. Sólo 37 observadores fueron capaces de hacer una igualación que estuviera dentro de la zona entre 0.7 y 1.1 en la segunda igualación.

Observamos que al partir desde un punto aleatorio, en muchos sujetos la igualación se conseguía en un punto muy alejado de la zona normal y con una iluminación muy superior o inferior. Esto hizo que conseguir un rango de igualación en la mayoría de la población fuera muy difícil.

Una vez comentados los diferentes problemas, se llegó a la conclusión que con la prueba azul-amarillo del Anomaloscopio HMC, se debe tener especial cuidado a la hora de hacer una valoración. El instrumento sólo es capaz de diagnosticar un observador sin anomalías. En el caso de que se obtengan igualaciones fuera de esta zona, es el examinador quien tiene que evaluar el diagnóstico, ya que como hemos citado anteriormente, existe una gran probabilidad de que el observador no consiga una igualación del campo dentro del rango normal. Aunque esto no signifique que el sujeto tenga ningún defecto tritán, puede ser que un sujeto con un punto de igualación ligeramente fuera del rango normal sea un sujeto normal. Para un diagnóstico fiable y preciso se deberían comparar los resultados de la prueba de igualación del Anomaloscopio HMC con la prueba de ordenación FM-100 Hue.

Aunque en el gráfico se muestren las zonas de igualación de un paciente con glaucoma/diabetes o monocromatismo de conos azules, con la ecuación de Moreland no se puede hacer un diagnóstico preciso, sino que los resultados deben servir para detectar una posible patología en el caso de que el punto de igualación promedio o el rango de igualación se encuentre en alguna de estas zonas. Por tanto, en el caso de que los puntos de igualación se encuentren en la zona de glaucoma/diabetes, se debe sospechar de alguna posible patología. En el caso de que los puntos de igualación se encuentren dentro de la zona de monocromatismo de conos azules o acromatopsias se debe sospechar de una anomalía en los conos azules.

Tabla 19: Estudio de los resultados obtenidos de los sujetos del grupo 3 en cada una de las pruebas. El diagnóstico del FM-100 Hue se hizo de forma subjetiva por la observación del patrón de ordenación.

Observadores	Ishihara	FM-100 Hue	Anomaloscopio	Anomaloscopio HMC		
			Davico	Prueba manual	Prueba de detección	Prueba específica
A1	Deteranomalía Fuerte	Deuteranomalía extrema/Deuteranopia	Normal	No posible	Deuteranopia	Deuteranopia
A2	Deuteranomalía Fuerte	Deuteranomalía extrema/Deuteranopia	Protanomalía	Deut. extrema	No posible	No posible
A3	Deteranomalía Leve	Normal	Deuteranomalía	Deuteranomalía	Deuteranomalía	Deuteranomalía
A4	Deuteranomalía Fuerte	Deuteranomalía	Normal desviante	Deuteranope	Deuteranopia	Deuteranopia
A5	Deuteranomalía Fuerte	Deuteranomalía extrema/Deuteranopia	Protanomalía	Deut. extrema	No posible	No posible

Con el Anomaloscopio Davico se obtuvo un resultado diferente al resto de pruebas exceptuando el sujeto A3. Aunque este tipo de dispositivos son de alta fiabilidad, hay que tener en cuenta siempre las características particulares de cada uno. En nuestro caso, tanto las láminas de Ishihara como el FM-100 Hue son dispositivos de reciente adquisición, pero el Anomaloscopio Davico pertenece a una edición limitada fabricada aproximadamente hace 20 años. Esto nos lleva a plantearnos su baja fiabilidad debido al envejecimiento de los leds que proporcionan las luces, lo que se traduce en particular en una baja intensidad en el campo fijo de comparación.

Debido a este problema, los resultados del Anomaloscopio Davico deben de servir sólo como una valoración de una posible baja discriminación de los colores y una posible deficiencia en la discriminación de éstos.

No ocurre lo mismo con el Anomaloscopio HMC, adquirido en los últimos meses en el departamento de Óptica, Farmacología y Anatomía, siendo además un dispositivo de gama alta debido a las prestaciones y características aseguradas por el fabricante (Oculus. Instruction Manual HMC Anomaloskop M).

Analizando los diferentes diagnósticos con las tres pruebas del Anomaloscopio HMC observamos que existen diferencias en cada uno de los diagnósticos de cada prueba. La posible causa fue la dificultad de realizar una igualación en algunos sujetos, pues debido a la gravedad de la anomalía, muchos de los colores que se presentaban se observaban como iguales. Esto complicaba el diagnóstico haciendo imprescindible realizar varias igualaciones con las diferentes pruebas disponibles.

VII - ESTUDIO DE LA VISIÓN DEL COLOR EN UN SUJETO DIABÉTICO.

Está bien documentado que los pacientes que sufren de diabetes pueden mostrar alteraciones en su percepción del color. Alteraciones metabólicas causadas por altos niveles de glucosa en sangre causan hipoxia y muerte celular en la retina de los diabéticos aunque la etiología de la retinopatía diabética sigue sin estar clara, y las zonas afectadas de la retina debido a la hipoxia son aún desconocidas. (Kurtenbach, A. 1990).

El objetivo de este estudio fue obtener información acerca de la ecuación de Moreland como método de diagnóstico con el Anomaloscopio HMC. Para ello se ha realizado un estudio de la visión del color de un observador con diabetes. Como hemos citado anteriormente, este tipo de enfermedad está directamente relacionada con una posible disfunción en la respuesta de los conos S y esto se traduce en un desplazamiento en la curva

de sensibilidad espectral de estos receptores causando una baja discriminación de los tonos azules.

El estudio se realizó con un observador de 54 años con diabetes tipo II, en el que los niveles de glucosa han estado controlados regularmente. Este sujeto refirió la necesidad de conocer la existencia de un posible defecto cromático debido a que por motivos profesionales se le exige una buena discriminación del color.

Láminas de Ishihara

Con esta prueba, el observador fue capaz de leer correctamente las 25 láminas. Los resultados con las láminas de Ishihara nos muestran que con esta prueba no existe ningún defecto rojo-verde.

Anomaloscopio Davico

La media de los 6 puntos de igualación con el Anomaloscopio Davico fue de 72 ± 1 . Como el punto de igualación promedio se encuentra dentro del rango 65-75, el resultado para esta prueba es normal.

FM-100 Hue

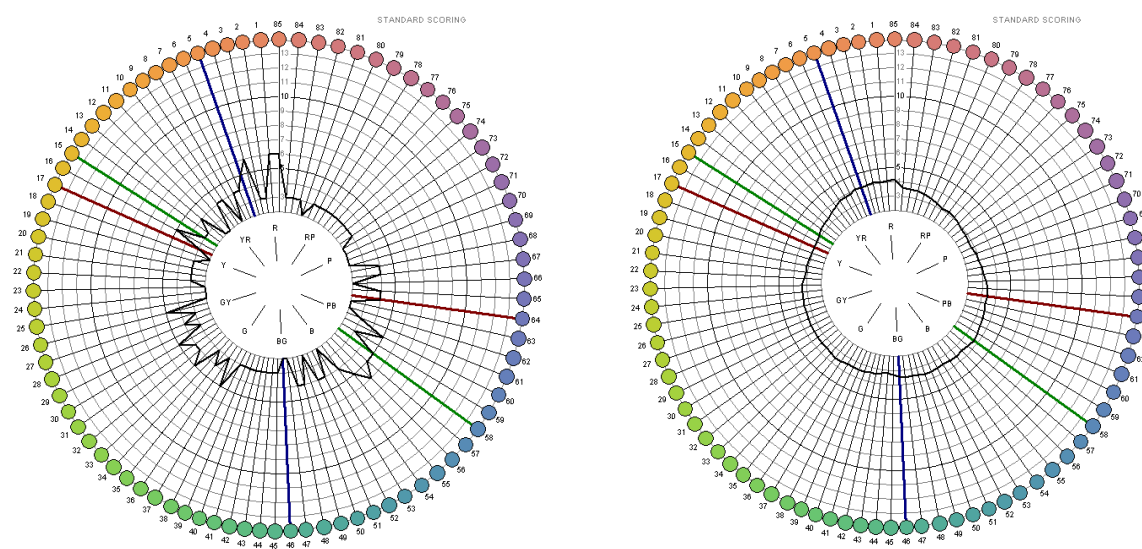


Figura 28: Gráfico FM-100 Hue del observador diabético. A la derecha se muestra el gráfico tras aplicar un filtro de suavizado.

Con el FM-100 Hue se obtuvo una baja discriminación cromática en todo el rango de tonos de la esfera. Se aprecia una mayor pérdida de discriminación cromática en el eje situado sobre la ficha número 5. Por tanto, con esta prueba se observa que existe una mayor pérdida de discriminación cromática en los colores azules. La zona de máxima pérdida se encuentra sobre el eje de un defecto tritán (ficha 5).

El error total de esta prueba fue de 116.

ANOMALOSCOPIO HMC

Tabla 20: Diagnósticos de las pruebas de visión del color con el Anomaloscopio HMC

	Ecuación de Rayleigh				Ecuación de Moreland					
	Prueba manual		Prueba de detección		Prueba manual		Prueba de detección		Prueba específica	
AQ	1.27	1.14	1	1	13.93	0.96	124	0	49	0.25
M	35.7	37.6	40	40	6.7	79.6	0.8	99.6	2	80
R	16.9	16.1	15.3	15.3	17.3	63.5	12.5	77.3	14.9	65.9
Diagnóstico	Normal		Normal		No posible		No posible		No posible	

Blue-Green Color Vision

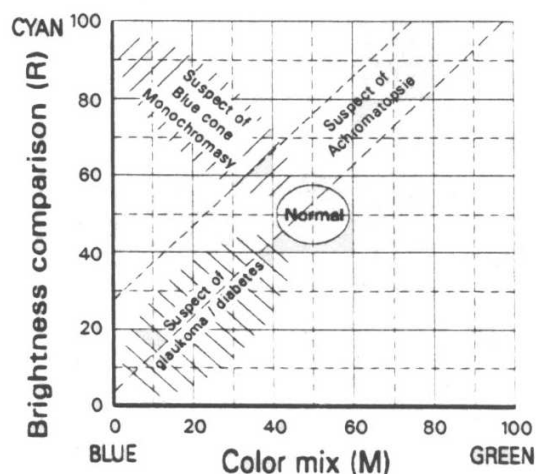


Figura 29: Test de color azul-amarillo de Moreland.

Por el diagnóstico que se obtuvo con el Anomaloscopio HMC con la ecuación de Rayleigh y comparando con los resultados con las láminas de Ishihara y el Anomaloscopio Davico, el sujeto no presenta ninguna anomalía rojo-verde, sin embargo con el FM-100 Hue se muestra que existe una baja discriminación en todos los tonos.

Atendiendo a los defectos azul-amarillo, con el Anomaloscopio HMC no se pudo obtener un diagnóstico ya que los puntos de igualación estaban fuera del rango normal. Debido a esto se tiene que hacer un diagnóstico subjetivo.

En la tabla 20 se muestra que en las igualaciones de las diferentes pruebas de la ecuación de Moreland existe un rango de igualación muy grande. El sujeto era capaz de igualar la mayoría de las presentaciones en todo el rango de la mezcla de colores (M). Los datos muestran que todos los puntos de igualación estaban contenidos entre el extremo inferior derecho del gráfico (disminución del brillo hacia el azul) y el extremo superior izquierdo (aumento del brillo hacia el verde) siguiendo el patrón de Acromatopsia de conos azules.

Al comparar los resultados del Anomaloscopio HMC y del FM-100 Hue podemos concluir que el sujeto tiene una baja discriminación de los colores azules, pareciendo un sujeto con una acromatopsia de conos azules y que este defecto puede ser debido a la diabetes.

VIII - CONCLUSIONES

- Las láminas de Ishihara sólo son capaces de diagnosticar un defecto rojo-verde pero no es capaz de diferenciar entre un dicrómata y un tricrómata anómalo, pues sólo es capaz de diferenciar entre una Deuteranomalía/Protanomalía fuerte o leve.
- El Anomaloscopio Davico permite diferenciar entre un dicrómata y un tricrómata anómalo rojo-verde dependiendo del rango de igualación del sujeto, pero el dispositivo usado en este estudio presenta una baja fiabilidad debido al envejecimiento de las luminarias.

- El test FM-100 Hue permite diferenciar entre cualquier defecto cromático, ya sea protán, deután o tritán, sin embargo, mediante esta prueba no se consigue diferenciar entre un sujeto dicrómata o tricrómata anómalo. La valoración de la prueba y el diagnóstico se tiene que interpretar de forma subjetiva por el examinador mediante la comparación de resultados con otros test de visión del color.
- El Anomaloscopio HMC es la prueba de detección más completa del estudio, pues nos permite diagnosticar y diferenciar entre cualquier defecto cromático ya sea un sujeto dicrómata o tricrómata anómalo en la ecuación de Rayleigh. Sin embargo, todavía hay que comparar los datos en la ecuación de Moreland para obtener unos resultados fiables puesto que con el Anomaloscopio HMC todavía no se consigue distinguir estos dos tipos de defectos cromáticos, sólo nos permite conocer si el observador puede tener un defecto azul-amarillo debido a cualquier patología o simplemente por una baja discriminación de los receptores azul-amarillo.
- Debido a los problemas que tienen los sujetos al realizar la igualación del campo en la ecuación de Moreland, en todos los sujetos no se pudo obtener un rango de igualación ya que es posible que un mismo sujeto sea capaz de realizar una igualación en cualquier zona del campo. Esto hace que obtener un diagnóstico sea más complicado que con la ecuación de Rayleigh.
- En la ecuación de Rayleigh, el Anomaloscopio HMC es uno de las pruebas más fiables. Con esta ecuación, es posible obtener un AQ y un rango de igualación bastante preciso ya que existen test específicos para este problema. Sin embargo, en los observadores con un problema de visión de color hay que tener especial cuidado al realizar la igualación ya que debido a la gran cantidad de tonos en el campo de igualación, es difícil encontrar un punto de igualación. Para simplificar la prueba, se debe ayudar al observador fijando las zonas donde se va a intentar realizar la igualación de manera que el sujeto sólo tenga que cambiar la cantidad de luz y decirnos si ha sido posible igualar el campo.
- Las pruebas más rápidas para evaluar un posible defecto cromático son las láminas de Ishihara y el Anomaloscopio HMC mediante la prueba de detección o manual. Con ambos dispositivos se puede evaluar en unos minutos si el sujeto puede tener un posible defecto en la visión de los colores. Esto nos puede ayudar para conocer la incidencia de un defecto

cromático en una población grande, que nos permita obtener observadores para un estudio posterior más exhaustivo.

- Hemos elaborado un manual rápido de uso del dispositivo, recogiendo el procedimiento básico para la puesta en marcha de las diferentes pruebas.

MANUAL RÁPIDO DE USO DEL DISPOSITIVO

Crear un nuevo archivo para el paciente

- Inserte el nombre, apellido y fecha de nacimiento en la ventana “paciente” de la parte superior izquierda.
- Pulse el botón “Anomaloskop” de la parte superior derecha y aparecerá una ventana que nos pregunta si queremos crear un nuevo registro. Pulse “crear registro nuevo”.
- El menú que nos sale por defecto es el del examen rojo/verde (Rayleigh).

Opciones de examen

En el menú superior de la ventana se encuentran las siguientes cajas: Examination, Program, Colortest, Eye, Matching range y Settings.

- ▶ Examination: Con ella podemos crear un nuevo paciente, imprimir las gráficas de resultados y cargar los datos de un nuevo paciente.
- ▶ Program: Se encuentran las diferentes pruebas de examen (screening, manual, specific).
- ▶ Colortest: Se utiliza para cambiar la evaluación de las diferentes deficiencias de color (Rayleigh, Moreland).
- ▶ Eye: Se puede cambiar el ojo que se va a examinar.
- ▶ Matching range: Cambia el tiempo en el que nos va a aparecer el estímulo de adaptación neutral durante la prueba (relativo, absoluto o sin adaptación neutral)
- ▶ Settings: Nos lleva al menú de las configuraciones del sistema descritas en el manual de uso.

Realización del examen

Una vez seleccionadas las opciones deseadas, pulsar en la caja “Start” y el Anomaloscopio empezará a presentar las ecuaciones de color.

Resultados del examen

Una vez realizado el examen deseado, en la parte izquierda del menú nos aparecen los datos del examen con las diferentes opciones que hemos seleccionado previamente.

- En la parte superior se encuentran los datos del paciente (nombre y apellidos, fecha de nacimiento y fecha del examen).

- En la parte media se encuentra el tipo de programa, el test de color, el ojo que ha realizado la prueba, la adaptación neutral y el AQ, M, R (cociente de anomalía, mezcla de los primarios, intensidad de iluminación) que varía durante la transcurso de la prueba.

- En la parte inferior se muestra el diagnóstico realizado por el Anomaloscopio HMC, el tiempo que se ha empleado en realizar la prueba y el rango de igualación (rango comprendido entre la ecuación M de la izquierda y de la derecha).

IX - PROYECTOS DE FUTURO

- Debido a la dificultad para realizar la igualación de color en la ecuación de Moreland, queda pendiente encontrar un instrumento capaz de realizar un diagnóstico correcto, de forma que puedan validarse los resultados obtenidos con las diferentes pruebas de diagnóstico.

- Debido al tiempo limitado del estudio, queda pendiente encontrar sujetos con defectos de visión del color tipo protán y realizar su estudio ya que no ha sido posible encontrar este tipo de sujetos.

- También queda pendiente comprobar la eficacia en la detección de defectos de visión del color cómo acromatopsias, monocromatismos y defectos de tipo tritán en pacientes con diversas patologías como glaucoma, retinopatía diabética etc...

- Se intentaron diversas simulaciones de alteraciones de la visión del color mediante el uso de filtros coloreados, tanto de banda ancha como filtros de corte ($\lambda_1=440\text{nm}$, $\lambda_2=480\text{nm}$, $\lambda_3=500\text{nm}$, $\lambda_4=520\text{nm}$, $\lambda_5=540\text{nm}$, $\lambda_6=560\text{nm}$). Estos resultados no fueron concluyentes, ya que no existe un filtro que simule con éxito la pérdida de visión de un sistema de conos, por lo que no se han presentado en la memoria. Pero entra dentro de nuestras perspectivas hacer un estudio más exhaustivo ampliando la gama de filtros, con el fin de conseguir simular las alteraciones con muy baja incidencia, como son las azul-amarillo.

X- BIBLIOGRAFÍA

- Baraas, R. C., Foster, D.H., Amano K. y Nascimento, S. M. C. (2010). *Color Constancy of Red-Green Dichromats and Anomalous Trichromats*. IOVS, Vol. 51, No. 4
- Barbur, J.L., Rodriguez-Carmona, M., Harlow, J.A., Mancuso, K., Neitz J. y Neitz M. (2008). *A study of unusual Rayleigh matches in deutan deficiency*. 1. Applied Vision Research Centre, The Henry Wellcome Laboratories for Vision Sciences, City University, London, United Kingdom. 2. Medical College of Wisconsin, Department of Ophthalmology, Milwaukee, Wisconsin. Visual Neuroscience, 25, 507–516.
- Bell, J. (1926). *The Treasury of Human Inheritance: vol II. Anomalies and Diseases of the Eye*. London: Cambridge University Press.
- Birch, J. (2001). *Diagnosis of Defective Colour Vision*. Second Edition.
- Capilla, P., Artigas, J.M., Pujol J., coords. (2002). *Fundamentos de colorimetría*. Universidad de Valencia
- Chaves Fernandes, L. y Carvalho de Ventura Urbano, L. (2008). *Efficiency of color vision tests in hereditary dyschromatopsia: case report*. Arq Bras Oftalmol.; 71(4):585-8.
- Dean F, Dornhurst A, Arden GB (1997). *Partial reversal of protán and tritan colour defects with inhaled oxygen in insulin dependent subjects*. Br J Ophthalmol; 81:27–30.

- Vision Assembly of Behavioral (1981). *Procedures for Testing Color Vision*. Report of Working Group 4. Washington, D.C.
- Cvetković D y Cvetković D (2005). *Inherited colour vision deficiencies--from Dalton to molecular genetics*. Srp Arh Celok Lek.;133(11-12):521-7.
- Dain, S.J. (2007). *Know your colour vision challenges*. Clin Exp Optom; 90: 3:155–156
- Dain, S.J. (2004). *Clinical colour vision tests*. Optics and Radiometry Laboratory, School of Optometry and Vision Science, University of New South Wales, Sydney, NSW, Australia. Clin Exp Optom.; 87(4-5):276-93.
- de Fez, M.D. (2009). *Anomaloscopia y test Farnworth-munsell de 100 tonos*. Sesión de laboratorio de Óptica Fisiológica. Universidad de Alicante.
- Deeb, S.S. y Kohl, S. (2003). *Genetics of color vision deficiencies*. Departments of Medicine and Genome Sciences, University of Washington, Seattle, Wash., USA. Dev Ophthalmol.; 37:170-87.
- Donald Mc. Intyre (2002). *Colour Blindness. Causes and Effects*. Dalton publishing.
- Engelking, E. (1925). *The tritanomalous, a previously unknown anomalous trichromats*. V Graefes Arch Ophthalmol 116:196-243.
- Foster, D. H. (1991). *Vision and visual dysfunction. Volume 7. Inherited and Acquired Colour Vision Deficiencies: Fundamental Aspects and Clinical Studies*. The Macmillan Press Ltd.
- Francois, J. y Verriest, G. (1961). *Functional abnormalities of the retina*. In J. Francois, Heredity in Ophthalmology. St. Louis, Mo.: The C.V. Mosby Company
- Glickstein, M. y Health, G. G. (1975). *Receptors in the monochromat eye*. Vision Research 15, 633-636.

- Grupo de Visión y Color de la Universidad de Alicante. (2006). *Óptica pura y aplicada*. www.sedoptica.es .39 (3), 255-260
- Jaeger, W. (1972). *Genetics of congenital color deficiencies*. Pp. 625-659 in Jameson D, Hurvich LM (eds.), *Handbook of Sensory Physiology*, vol. VII/4 - Visual Psychophysics. Berlin: Springer-Verlag.
- Jagle, H., Pirzer, M. y Sharpe, L.T. (2005). *The Nagel anomaloscope: Its calibration and recommendations for diagnosis and research*. Graefe's Arch Clin. Exp. Ophthalmol. 243:26-32.
- Jiménez del Barco Jaldo, J.M. V Congreso Nacional sobre Gestión del Color en Artes Gráficas. Comunicación del color. Departamento de Óptica de la Universidad de Granada.
- Jordan, G. y Mollon, J.D. (1998). *Shift in Rayleigh matches after adaptation to monochromatic light of various intensities*. Department of Experimental Psychology University of Cambridge Downing Street Cambridge. Vision Research 28. 3253-3257.
- Kalmus, H. (1965) *Diagnosis and Genetics of Defective Colour Vision*. Oxford, England: Pergamon Press.
- Krill, A.E. y Schneiderman A. (1964). *A hue discrimination defect in so-called normal carriers of color vision defects*. Invest Ophthalmol 3:445.
- Kurtenbach, A., Schiefer, U., Neu, N. y Zrenner, E. (1990). *Preretinopic changes in the colour vision of juvenile diabetics*. Br J Ophthalmol; 83:43-46
- Lakowski, R. (1958). *Age and colour vision*. Advancement of Science 15:231-236.
- Lakowski, R. (1962). *Is the deterioration of colour discrimination with age due to lens or retinal changes?* Farbe 11:69-86.

- Lakowski, R. (1968). *Colour-matching ability--can it be measured?* J Soc of Dyers and Colourists 84:3-9.
- Lakowski, R. (1972). *The Pickford-Nicolson anomaloscope as a test for acquired dyschromatopsias.* Mod Probl Ophthalmol 11:25-33.
- Luque, M.J. (2010). *Métodos basados en la visión del color.* Máster Optimetría Avanzada y Ciencias de la Visión. Universidad de Valencia.
- Luque, M. J., de Fez, M. D. y Díez, M.A. (2001). *Directrices para la administración y puntuación del test Farnsworth-Munsell de 100 tonos.* Departamento de óptica de la universidad de Valencia y Alicante. Ver y oír.
- Manual of Dean Farnsworth. Revised 1957. *The Farnsworth-Munsell 100-Hue Test for the examination of color discrimination.* Little Britain Road. New Windsor, New York 12552.
- Maureen, N, Carroll, J., Renner, A., Knau, H., John S. Werner y Neitz, J. (2004). *Variety of genotypes in males diagnosed as dichromatic on a conventional clinical anomaloscope.* Vis Neurosci.; 21(3): 205–216.
- Med, Q.J. (2009). *Red–green blindness.* Coda; 102:669–670.
- Miyahara, E. (2009). *Chromaticity co-ordinates of Ishihara plates reveal that hidden digit plates can be read by S-cones.* Department of Psychology, California. USA. Clinical and experimental Optometry.; 5:434-439
- Miyahara, E. (2008). *Errors reading the Ishihara pseudoisochromatic plates made by observers with normal colour vision.* Clin Exp Optom; 91: 2: 161–165.
- Moreland, J.D. y Kerr, J. (1978). *Optimisation of stimuli for tritanomaloscopy.* Modern Problems in Ophthalmology 19, 162–166.

- Moreland, J.D., Torczynski, E. y Tripathi, R. (1991). Rayleigh and Moreland matches in the ageing eye. *Documenta Ophthalmologica Proceedings Series* 54, 347–352.
- Moreland, J.D. (2004). *Moreland match revisited*. *Visual Neuroscience*, 21, 471–476.
- Moskowitz, A, Hansen, R.M., Akula, J.D., Eklund S.E.y Fulton, A.B. (2009). *Rod and Rod-driven Function in Achromatopsia and Blue Cone Monochromatism*. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 50(2): 950–958
- Oculus. *Instruction Manual HMC Anomaloskop MR (Moreland and Rayleigh (Typ 47700)*.
- Oculus. *Software Module. User's Manual*.
- Ohta, M. (1961). *Study on the generalized color discrimination test. Report 1*. *Acta Ophthalmol (Jpn)* 65:512-519.
- Ohta, Y. y Kato, H. (1976). *Colour perception changes with age*. Test results by P-N anomaloscope. *Mod Probi Ophthalmol* 17:345-352.
- Paulson, H.M. (1980). *The X-Chrom lens for correction of color deficiency*. *Military Medicine* 145(8):557-560
- Pelizzone, R.A., Hermes D, M. y Sommerhalder J (1990). *The examination of color vision using a 2 metamer equation method*. *Clinique d'Ophtalmologie, Hôpital Cantonal Universitaire, Genève, Suisse. Ophtalmologie.*; 4(2):197-205.
- Pokorny, J. y Smith, V. C. (1976). *Effect of field size on red-green color misture equations*. Eye Research Laboratories, *J.Opt. Am.*, Vol 66, No. 7.
- Pokorny J, Smith VC, Went LN (1981). Color matching in antosomal dominant tritan defect. *J Opt Soc Am* 71:1327-1334.
- Pokorny, J., Smith, V.C. y Lutze, M. (1987). Aging of the human lens. *Applied Optics* 26, 1437–1440.

- Rodríguez-Carmona, M. Sharpe, L.T., Harlow J.A. y Barbur. J.L.(2008). *Sex-related differences in chromatic sensitivity*. Applied Vision Research Centre, The Henry Wellcome Laboratories for Vision Sciences, City University, London, United Kingdom. Institute of Ophthalmology, University College London, London, United Kingdom. Visual Neuroscience, 25, 433–440
- Roth, A., Pelizzone, M., Sommerhalder, J., Hermés, D. y Simona, F. (1991). The two equation method: III. Results in normal subjects above 50 years of age. Correlation with lens opacity. *Documenta Ophthalmologica Proceedings Series* 54, 353–359.
- Schürer M, Walter A, Eppig T, Brünner H y Langenbucher A (2009). *Measurement set-up for estimation of colour discrimination thresholds of colour vision deficiencies and while wearing coloured filters*. Medizinische Optik am Institut für Medizinische Physik, Universität Erlangen-Nürnberg. Klin Monbl Augenheilkd.; 226(7):546-54.
- Shinobu Ishihara M.D., Dr. Med. Sc. Professor Emeritus of the University of Tokyo. *The Series of Plates Designed as a Test for Colour-Deficiency*. Kanehara Trading Inc. Tokyo.Japan.
- Smith, V.C., Pokorný, J. y Swartley, R. (1973). *Continuous Hue estimation of Brief flashes by Deuteranomalous Observers*. American Journal of Psychology. Vol. 86, no.1 pp. 115-131.
- Smith VC y Pokorný J (1977). Large-field trichromacy in protanopes and deuteranopes. J Opt Soc Am 67:213-220.
- Stillman, J.A. (2008). *Psychophysical influences on the validity of anomaloscopic assessments of color vision*. Massey University Albany, Auckland, New Zealand. Perception & Psychophysics., 70 (7), 1243-1247.
- Sun, Y. y Shevell, S.K. (2008). *Rayleigh matches in carriers of inherited color vision defects: The contribution from the third LOM photopigment*. Department of Psychology and Ophthalmology and Visual Science, University of Chicago, Chicago, Illinois. 25, 455–462

Swanson, W.H. y Cohen, J.M. (2003). *Color vision*. Ophthalmol Clin North Am. ;16(2):179-203

Toyeé. M.J. (2008) *An Introduction to the Visual System*. Cambridge University Press.

Verriest, G. (1963). *Further studies on acquired deficiency of color discrimination*. J Opt Soc Am 53:185-195.

Waardenburg, P.J., Franceschetti A., Klein, D. (1963). *Colour sense and dyschromatopsia*. Pp. 1425-1566. Genetics and Ophthalmology, vol II. Assen, Netherlands: Royal van Gorcum.

Wyszecki, G. y Stiles, W.S. (1967). *Color Science*, 2nd edition 1982. New York: Wiley.